第 52 卷 第 2 期：652-672 高电压技术 Vol.52, No.2: 652-672
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250320

基于优先顺序法的机组爬坡约束启发式调整策略

王广宏，李冠冠，彭　克，王　蕾
（山东理工大学电气与电子工程学院，淄博 255000）

摘　要：针对优先顺序法所求机组调度计划中因日内净负荷的波动导致违反爬坡约束的问题，该文设计了机组爬坡约束启发式调整策略，以应对机组频繁出力变化。首先，在满足功率平衡约束、旋转备用约束及机组出力边界约束的条件下得到机组调度的初始解；其次，通过最小启停时间约束机组调整策略与冗余机组调整策略得到机组调度的近似解；然后分别在考虑系统功率平衡和需求响应的基础上设计了 2 种爬坡约束机组调整策略，并进一步提出计及爬坡约束的精确冗余/缺额机组调整策略；最后，考虑到机组冷/热启动费用的差异，利用机组启动方式调整策略得到机组调度的最终解。仿真结果表明，所提方法在优先顺序法的基础上，通过启发式调整策略调整机组出力满足爬坡约束和调节冗余/缺额机组出力、降低机组运行费用的同时，快速给出了机组调度计划。
关键词：优先顺序法；机组调度；启发式调整策略；爬坡约束机组调整策略；精确冗余/缺额机组调整策略

Heuristic Adjustment Strategy of Unit Ramp Rate Constraints Based on Priority List

WANG Guanghong, LI Guanguan, PENG Ke, WANG Lei
(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: To address the issue of constraint violations caused by net load fluctuations in unit dispatch, this paper proposes a heuristic ramp constraint adjustment strategy by leveraging priority list approach to mitigate frequent variations of generation output. First, an initial unit dispatch solution is obtained by considering the system power balance, spinning reserve, and unit output boundary constraints. Then, an approximate solution is derived using the minimum start/stop time constraint unit adjustment strategy and the redundant unit adjustment strategy. Two distinct ramp-constrained unit adjustment strategies are developed by considering system power balance and demand response, respectively. Additionally, a precise redundant/deficient unit adjustment strategy that incorporates ramp rate constraints is proposed. Finally, the differences in unit cold/hot start costs are taken into consideration,and the final unit dispatch solution is obtained through a unit start-up mode adjustment strategy. Simulation results indicate that the priority list based approach adjusts the generation output to satisfy ramping constraints and quickly generates the dispatch results through a heuristic adjustment strategy while reducing operating costs by regulating redundant/deficient unit outputs.
Key words: priority list; unit dispatch; heuristic adjustment strategy; ramp-constrained unit adjustment strategies; precise redundant/deficient unit adjustment strategy

0　引言

随着工业社会的发展和用电负荷的增加，电力系统日内净负荷波动特性日益显著。为适应净负荷波动并满足负荷需求，需要不断调整机组出力[1-2]。然而，由于机组爬坡能力的限制，当净负荷波动速度超过机组最大爬坡速率时，机组出力变化无法及时响应负荷需求，进而导致爬坡越限等问题[3-4]。因此，如何在净负荷波动的情况下，快速有效地处理爬坡约束并制定合理的机组调度计划，成为保障电力系统安全稳定运行的关键挑战[5-6]。

动态规划法、拉格朗日松弛等数学优化方法通过建立精确的数学模型并进行求解，能够有效处理爬坡约束，并制定精确的机组调度计划[7-9]。这些方法在理论上可以保证解的最优性，但是在实际调度求解过程中，由于爬坡约束的连续时间特性，运算量大，导致整体的机组调度求解时间较长[10-11]。优先顺序法、逆序排序法等启发式算法凭借其快速计算的优势，在工业实践中得到了广泛应用[12]。其中，优先顺序法按照各发电机组的经济特性确定排序指

基金资助项目：山东省自然科学基金(ZR2023QF158)。
Project supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2023QF158).

标，并依次制定机组投切和出力方案，具有较快的求解速度[13]。传统的优先顺序法基于机组经济特性排序以制定机组调度计划，虽然可以满足功率平衡约束和旋转备用约束，但难以兼顾最小启停时间约束和爬坡约束这样复杂约束的要求，导致解的质量不高[14]。文献[15-16]分别通过启发式调整方法和松弛固定的启发式方法对优先顺序法所得机组调度计划进行了调整，但是均未考虑机组爬坡约束。为获得满足爬坡约束的解，文献[17]在所提扩展优先顺序法中引入了爬坡约束的处理策略，但在解除冗余机组策略中忽略了爬坡约束的影响。文献[18-21]将优先顺序法与多种优化方法相结合，包括内点法、邻域搜索法、差分进化算法、深度遍历和广度迭代等方法，得到了满足机组爬坡约束的解。然而这些文献在处理爬坡约束时将优先顺序法与其他复杂优化算法相结合，难以避免迭代求解时间长、计算效率低等问题。

针对优先顺序法所得解难以满足爬坡约束的问题，本文摒弃优先顺序法与其他算法相结合的思路，借助优先顺序法的快速求解优势设计基于启发式规则的机组爬坡约束调整策略。该策略考虑了爬坡约束机组调整策略、精确冗余/缺额机组调整策略和机组启动方式调整策略，通过调整机组出力和启停计划，直接在优先顺序法的框架内快速有效地处理爬坡约束，得到机组调度计划。以常规机组组合模型为例，首先，在考虑系统功率平衡约束、旋转备用约束和机组出力边界约束的基础上得到机组组合问题的初始解；其次，利用最小启停时间约束机组调整策略和冗余机组调整策略，得到不考虑爬坡约束的机组组合问题的近似解；然后，从近似解入手，分别在考虑系统功率平衡和需求响应的基础上设计了 2 种爬坡约束机组调整策略；接着在考虑机组出力边界约束、最小启停时间约束和爬坡约束的基础上对冗余/缺额机组进行调整，进一步提出了更精确的冗余/缺额机组调整策略；最后，考虑到机组冷/热启动方式的不同，利用机组启动方式调整策略得到机组组合问题的最终解，并通过仿真验证了所提方法的有效性。

1　常规机组组合模型

1.1　目标函数

常规机组组合的目标函数主要考虑了机组燃料成本、开机成本和切负荷惩罚成本，如下所示：

$$\min F=\sum_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}}\sum_{g=1}^{N_{\mathrm{G}}}\left(F_g(P_{g,t})u_{g,t}+u_{g,t}(1-u_{g,t-1})C_{g,t}\right)+\pi_{\mathrm{D}}\sum_{t=1}^{N_{\mathrm{T}}}P_t^{\mathrm{cut}} \tag{1}$$

式中：F 为总运行费用；N_{T} 为总优化时段；N_{G} 为发电机组数量；$P_{g,t}$ 为 t 时刻发电机组 g 的出力；P_t^{cut} 为 t 时刻的切负荷量；π_{D} 为切负荷惩罚系数；$u_{g,t}$ 为 0-1 整数变量，表示 t 时刻发电机组 g 的启停状态；$F_g(\cdot)$ 为发电机组 g 的燃料费用，表达式为：

$$F_g(P_{g,t})=a_gP_{g,t}^2+b_gP_{g,t}+c_g \tag{2}$$

式中：a_g、b_g 和 c_g 均为发电机组 g 的发电成本系数。发电机组 g 的开机成本为：

$$\begin{cases}C_{g,t}=C_g^{\mathrm{hot}},\ T_g^{\mathrm{off}}\le T_{g,t}^{\mathrm{off}}\le T_g^{\mathrm{off}}+T_g^{\mathrm{cold}}\\ C_{g,t}=C_g^{\mathrm{cold}},\ T_{g,t}^{\mathrm{off}}>T_g^{\mathrm{off}}+T_g^{\mathrm{cold}}\end{cases} \tag{3}$$

式中：C_g^{hot} 和 C_g^{cold} 分别为发电机组 g 的热启动费用和冷启动费用；$T_{g,t}^{\mathrm{off}}$ 为机组 g 在 t 时刻已连续停机时间；T_g^{off} 为发电机组 g 的最小停机时间；T_g^{cold} 为机组 g 的冷启动时间。

1.2　约束条件

常规机组组合模型的约束主要包含机组出力边界约束、系统功率平衡约束、旋转备用约束、机组爬坡约束、启停逻辑约束、最小启停时间约束、和切负荷约束。

1）机组出力边界约束

$$P_g^{\min}u_{g,t}\le P_{g,t}\le P_g^{\max}u_{g,t} \tag{4}$$

式中：$P_g^{\min}$ 和 $P_g^{\max}$ 分别为发电机组 g 出力的最小值与最大值。

2）系统功率平衡约束

$$\sum_{g=1}^{N_{\mathrm{G}}}P_{g,t}+P_t^{\mathrm{cut}}=L_t \tag{5}$$

式中：L_t 为 t 时刻的负荷。

3）旋转备用约束

$$\sum_{g=1}^{N_{\mathrm{G}}}u_{g,t}P_g^{\max}\ge L_t+P_t^{\mathrm{R}} \tag{6}$$

式中：P_t^{R} 为 t 时刻的备用容量。

4）机组爬坡约束

$$P_{g,t}-P_{g,t-1}\le u_{g,t-1}\Delta P_g^{\mathrm{u}}+y_{g,t}P_g^{\mathrm{start}} \tag{7}$$

$$P_{g,t-1}-P_{g,t}\le u_{g,t}\Delta P_g^{\mathrm{d}}+z_{g,t}P_g^{\mathrm{shut}} \tag{8}$$

式中：ΔP_g^{u} 和 ΔP_g^{d} 分别为发电机组 g 上爬坡率和下爬坡率；P_g^{start} 和 P_g^{shut} 分别为发电机组 g 开机功率速度限制和停机功率速度限制；$y_{g,t}$ 和 $z_{g,t}$ 为 0-1 整数

变量，分别表示机组开机操作和停机操作。

5）启停逻辑约束

$$y_{g,t}-z_{g,t}=u_{g,t}-u_{g,t-1} \tag{9}$$

$$y_{g,t}+z_{g,t}\le 1 \tag{10}$$

式中：$y_{g,t}$ 取“1”表示 t 时刻机组 g 执行开机操作；$z_{g,t}$ 取“1”表示 t 时刻机组 g 执行停机操作。

6）最小启停时间约束

$$\sum_{s=t-T_g^{\text{on}}+1}^{t} y_{g,s}-u_{g,t}\le 0,\quad \forall g,t\in[T_g^{\text{on}}+1,N_{\text{T}}] \tag{11}$$

$$\sum_{s=t-T_g^{\text{off}}+1}^{t} z_{g,s}+u_{g,t}\le 1,\quad \forall g,t\in[T_g^{\text{off}}+1,N_{\text{T}}] \tag{12}$$

式中：$y_{g,s}$ 和 $z_{g,s}$ 分别表示 s 时刻机组 g 的开机操作和关机操作；T_g^{on} 为发电机组 g 的最小开机时间。

7）切负荷约束

为了限制当前时刻的所切负荷量，规定切负荷量不可超过该时刻的负荷量，即：

$$0\le P_t^{\text{cut}}\le L_t \tag{13}$$

2 初始解生成

优先顺序法通常采用平均满负荷费用作为排序因子确定机组的启停顺序[15]。平均满负荷费用是指机组在满发状态下的平均发电成本。在数值上，平均满负荷费用为机组满发状态下的发电成本与机组最大出力之比。以机组 g 为例，平均满负荷费用为：

$$h_g=\frac{F_g(P_g^{\max})}{P_g^{\max}} \tag{14}$$

计算出平均满负荷费用后，按照从小到大的顺序对机组进行排序，确定机组优先顺序。然后在满足系统功率平衡约束、旋转备用约束和机组出力边界约束的条件下，求解各个时刻的机组出力和启停状态，得到机组组合问题的初始解，具体过程详见附录 A。

3 启发式调整策略

本章在初始解的基础上依次介绍最小启停时间约束机组调整策略、冗余机组调整策略、爬坡约束机组调整策略、精确冗余/缺额机组调整策略和机组启动方式调整策略，总体的启发式调整策略的执行逻辑介绍见附录 B。

3.1 最小启停时间约束机组调整策略

最小启停时间约束机组调整策略通过开机操作的方式调整机组启停状态以满足最小启停时间约束，从而完成机组启停时间的调整[22]。如图 1 所示，假设机组的最小开机和停机时间均为 3 h。在图 1(a)中，当机组不满足最小开机时间约束时，机组需在 04:00 开机。在图 1(b)中，当机组不满足最小停机时间约束时，若要求机组在 05:00 刻停机，可能会违反该时刻的旋转备用约束和系统功率平衡约束。为了满足系统负荷需求，机组需要在 03:00—04:00 开机。同时，当机组 g 在 t 时刻的状态由“0”变为“1”时，机组出力调整为式(15)，结合文献[17]和式(15)可完成机组启停时间的调整。

$$P_{g,t}=P_g^{\min} \tag{15}$$

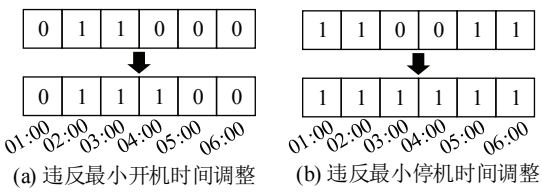
3.2 冗余机组调整策略

当机组出力之和超过总负荷需求时，部分机组出力冗余。为了减少运行成本，需要减少冗余机组的出力。在冗余机组调整过程中，冗余机组调整策略考虑了机组出力边界约束、功率平衡约束和旋转备用约束的影响，没有考虑爬坡约束。考虑旋转备用约束的影响，冗余机组调整策略仅通过减少冗余机组出力的方式完成调整，不需要关闭机组。为了节省运行费用，需要从优先级最低的机组开始调整。经最小启停时间约束调整策略和冗余机组调整策略得到不考虑爬坡约束的机组组合的解，称之为近似解。冗余机组调整策略的具体过程见附录 C。

3.3 爬坡约束机组调整策略

3.3.1 机组爬坡约束的分析

经过上述调整，近似解已经满足了不含爬坡约束的机组组合调度方案，但是存在部分机组出力违反爬坡约束的情况，以机组 g 在 01:00—12:00 的近似解为例，如表 1 所示。机组出力的最小值与最大值分别为 30 MW 和 150 MW，上/下爬坡率均为 30 MW，开/停机功率速度限制分别为 50 MW 和 60 MW。由表 1 可知，06:00、07:00 的机组出力不满足爬坡约束。若 07:00 的出力以 06:00 的出力为标准进行调整，则出力变为 107 MW。此时，07:00 机组出力的减少可能导致该时刻无法满足功率平衡



(a) 违反最小开机时间调整　(b) 违反最小停机时间调整

图 1 机组启停状态调整

Fig.1 Unit start/stop status adjustment

要求。这说明若按照前一时刻出力来调整后一时刻出力，则可能会使后一时刻出力减少，进而导致后一时刻功率缺额。同时，05:00、09:00 的机组出力也违反了爬坡约束。如果将这 2 个时刻的机组出力下降到开/停机功率速度限制，可能导致这 2 个时刻功率缺额。若保持 05:00、09:00 机组出力不变，为了保证机组平稳启停，需要在 04:00、10:00 开机，则又需要考虑最小启停时间约束的影响。

综上，本文提出了 2 种爬坡约束机组调整策略。一是在考虑系统功率平衡的基础上进行调整；二是利用需求响应可切负荷特性进行调整。为了方便描述，在近似解中，根据机组启停变化对机组进行分类：全时段保持开机的机组称为常开机组，保持停机的机组称为常停机组，出现启停变化的机组称为启停机组。同时，将机组连续开机时段记为“1”型时段，机组连续停机时段记为“0”型时段。例如，表 1 中 01:00—04:00 和 10:00—12:00 为“0”型时段，05:00—09:00 为“1”型时段。由于常停机组和某些常开机组全时段恒定保持最大出力，不存在违反爬坡约束的情况，因此只需对启停机组和全时段出力出现变化的常开机组进行调整即可。

3.3.2　策略 1

为了避免功率缺额，策略 1 在考虑系统功率平衡的基础上通过增加机组出力的方式以满足爬坡约束。针对“1”型时段机组出力的调整，设计了一种“顺时增大、逆时检验”的启发式调整方法，具体过程如式(16)—(18)所示，其中 t_{ini} 和 t_{fin} 分别表示“1”型时段的初始时刻和末尾时刻，流程图见附录 D 图 D1。

1）顺时增大：

①令 $t = t_{\mathrm{ini}} + 1$。

②若 $P_{g,t} - P_{g,t-1} > \Delta P_g^{\mathrm{u}}$，则有：

$$P_{g,t-1} = P_{g,t} - \Delta P_g^{\mathrm{u}} \tag{16}$$

若 $P_{g,t-1} - P_{g,t} > \Delta P_g^{\mathrm{d}}$，则有：

$$P_{g,t} = P_{g,t-1} - \Delta P_g^{\mathrm{d}} \tag{17}$$

③$t := t + 1$，若 $t \le t_{\mathrm{fin}}$，则转②；否则结束调整。

2）逆时检验：

①令 $t = t_{\mathrm{fin}}$。

②若 $P_{g,t} - P_{g,t-1} > \Delta P_g^{\mathrm{u}}$，则有：

$$P_{g,t-1} = P_{g,t} - \Delta P_g^{\mathrm{u}} \tag{18}$$

③$t := t - 1$，若 $t > t_{\mathrm{ini}}$，则转②；否则结束调整。

由式(16)—(18)可知，“顺时增大”并非以前一时刻机组出力为标准来调整后一时刻机组出力，而是以增加机组出力为标准来调整前/后一时刻机组出力。从首端时刻开始，若后一时刻机组出力违反前一时刻的上爬坡约束，则增加前一时刻机组出力；若后一时刻机组出力违反前一时刻的下爬坡约束，则增加后一时刻机组出力。“顺时增大”结束后机组出力没有下降，所以出力不会违反下爬坡约束。

由于某个时刻的机组出力一般与前后 2 个时刻相耦合，因此“顺时增大”可能会导致机组出力调整过大的问题。以表 2 中 3 个时刻机组出力为例，机组的上/下爬坡率均为 20 MW。第 2 列为未调整前的机组出力，此时 t 时刻机组出力不满足 t–1 到 t 时刻的下爬坡约束；按照“顺时增大”的方法，第 3 列将 t 时刻机组出力提高到 20 MW。虽然满足了 t–1 到 t 时刻的上爬坡约束，但不满足 t 到 t+1 时刻的上爬坡约束。因此，第 4 列将 t 时刻机组出力提高到 70 MW。但此时虽然满足了 t 到 t+1 时刻的上爬坡约束，却违反了 t–1 到 t 时刻的上爬坡约束。因此，“顺时增大”的方法不能完全满足爬坡约束。

此时采用“逆时检验”的方法对上爬坡约束进行检验，即从末尾时刻开始，检验后一时刻机组出力是否满足前一时刻机组出力的上爬坡约束。若不满足，则增加前一时刻机组出力。在表 2 中，第 5 列采取“逆时检验”的方法，将 t–1 时刻的机组出力提高到 50 MW，从而满足了 3 个时刻的爬坡约束。

表 1　机组启停状态和出力

Table 1　Unit start/stop status and generation

时刻/时段	机组状态	机组出力/MW
01:00—04:00	0	0
05:00	1	60
06:00	1	77
07:00	1	150
08:00	1	115
09:00	1	70
10:00—12:00	0	0

表 2　机组出力调整

Table 2　Unit output adjustment

时刻	机组出力/MW			
	未调整前	“顺时增大”一次调整	“顺时增大”二次调整	“逆时减小”调整
t–1	40	40	40	50
t	10	20	70	70
t+1	90	90	90	90

针对全时段出力出现变化的常开机组，该机组全时段为“1”型时段，直接采取“顺时增大、逆时检验”调整机组出力以满足爬坡约束。针对启停机组，由于启停机组全时段同时包含“1”型时段和“0”型时段，“0”型时段中可能包含首端时刻(01:00)、末端时刻(24:00)或者仅包含中间时刻(02:00—23:00)，因此在启停机组的调整过程中，不仅需要增加“1”型时段的机组出力，还可能需要对“0”型时段某些时刻的机组状态进行调整，因此需要考虑最小启停时间约束的影响。首先对“1”型时段采取“顺时增大、逆时检验”的方法来调整机组出力以满足爬坡约束。然后分别对含有首端时刻、末端时刻和仅含有中间时刻的“0”型时段进行调整，具体调整过程详见附录 E。

3.3.3 策略 2

由 3.3.1 节分析可知，若直接按照前一时刻机组出力来调整后一时刻机组出力，则可能会使后一时刻机组出力减少，导致后一时刻功率缺额。策略 1 为了避免功率缺额，因此在考虑系统功率平衡的基础上通过增加机组出力的方式以满足爬坡约束。与策略 1 不同，策略 2 则是引入需求响应可切负荷特性，以切负荷惩罚的形式弥补功率缺额以满足爬坡约束，并在“1”型时段即可完成调整。其中，全时段出力出现变化的常开机组采用“顺时调整”的启发式调整方法，启停机组采用“顺时调整、逆时减少”的启发式调整方法，具体过程如下文所述。

1）全时段出力出现变化的常开机组

顺时调整：

①令 $t=2$。

②若 $P_{g,t}-P_{g,t-1}>\Delta P_g^{\mathrm{u}}$，则有：

$$P_{g,t}=P_{g,t-1}+\Delta P_g^{\mathrm{u}} \tag{19}$$

若 $P_{g,t-1}-P_{g,t}>\Delta P_g^{\mathrm{d}}$，则有：

$$P_{g,t}=P_{g,t-1}-\Delta P_g^{\mathrm{d}} \tag{20}$$

③$t:=t+1$，若 $t\le N_{\mathrm{T}}$，则转②；否则结束调整。

根据上述调整过程可知，与“顺时增大”不同，“顺时调整”是直接根据前一时刻机组出力为标准来调整后一时刻机组出力，以确保机组出力满足爬坡约束。由此而产生的功率缺额，则通过切负荷惩罚的形式进行弥补。

2）启停机组

启停机组调整需要考虑开/停机功率速度限制的影响，如表 3 所示。首先需要对“1”型时段左右两端时刻机组出力进行调整，然后采用“顺时调整、逆时减少”的启发式调整方法调整机组出力。以表 3 中 t_2—t_3 的“1”型时段为例，“顺时调整、逆时减少”的流程图见附录 D 图 D2。

表 3 机组全时段启停状态

Table 3 Unit full-time start/stop status

时段	机组状态
01:00—t_1	0
t_2—t_3	1
t_4—24:00	0

首先需要对 t_2 和 t_3 时刻的机组出力进行调整，然后采用“顺时调整”的方法调整 t_2—t_3 时段的机组出力，最后采用“逆时减少”的方法，对机组下爬坡约束进行检验，具体过程如下文所述。

若 $P_{g,t_2}>P_g^{\mathrm{start}}$，则有：

$$P_{g,t_2}=P_g^{\mathrm{start}} \tag{21}$$

若 $P_{g,t_3}>P_g^{\mathrm{shut}}$，则有：

$$P_{g,t_3}=P_g^{\mathrm{shut}} \tag{22}$$

(1)顺时调整：

①令 $t=t_2$。

②若 $P_{g,t}-P_{g,t-1}>\Delta P_g^{\mathrm{u}}$，则有：

$$P_{g,t}=P_{g,t-1}+\Delta P_g^{\mathrm{u}} \tag{23}$$

若 $P_{g,t-1}-P_{g,t}>\Delta P_g^{\mathrm{d}}$，则有：

$$P_{g,t}=P_{g,t-1}-\Delta P_g^{\mathrm{d}} \tag{24}$$

③$t:=t+1$，若 $t\le t_3$，则转②；否则结束调整。

(2)逆时减少：

①令 $t=t_3$。

②若 $P_{g,t}>P_g^{\mathrm{shut}}$，则有：

$$P_{g,t}=P_g^{\mathrm{shut}} \tag{25}$$

转③，否则结束调整。

③若 $P_{g,t-1}-P_{g,t}>\Delta P_g^{\mathrm{d}}$，则有：

$$P_{g,t-1}=P_{g,t}+\Delta P_g^{\mathrm{d}} \tag{26}$$

转④，否则结束调整。

④$t:=t-1$，若 $t>t_2$，则转③；否则结束调整。

由式(23)—(26)可知，“顺时调整”的过程中可能出现右端 t_3 时刻机组出力增大违反爬坡约束的问题。此时采取“逆时减少”的方法，以后一时刻机组出力检验前一时刻机组出力是否满足下爬坡约束。若不满足，则减少前一时刻机组出力，所造成的功率缺额通过切负荷惩罚的形式进行弥补，从而完成启停机组的调整。

3.4 精确冗余/缺额机组调整策略

在 3.3 节中，策略 1 可能导致某些时刻出现冗

余机组，需要进行冗余机组调整；策略 2 可能导致某些时刻出现冗余或缺额机组，需要进行冗余/缺额机组调整。为此在考虑各约束条件的基础上通过依次调整各个时刻的机组出力和启停状态，提出了更精确的冗余/缺额机组调整策略。

3.4.1　精确冗余机组调整策略

精确冗余机组调整策略是在进一步考虑爬坡约束的基础上通过减少机组出力的方式来调整冗余机组的出力。由于首端时刻和末端时刻的机组出力受一端相邻时刻机组爬坡约束的影响，而中间时刻受到两端相邻时刻机组爬坡约束的影响，因此调整过程将全时段分为含首端时刻和末端时刻的首端时段(01:00—02:00)和末端时段(23:00—24:00)、以及仅含中间时刻的中间时段(02:00—23:00)分别进行调整。同时，机组出力可减少量不仅考虑到机组出力边界约束，还要兼顾爬坡约束的影响，具体调整过程见附录 F。

3.4.2　精确缺额机组调整策略

某些时刻机组出力之和可能低于当前时刻的负荷，导致机组出力缺额。为了减少切负荷惩罚成本，需要增加这些缺额机组的出力。精确缺额机组调整策略是在考虑爬坡约束的基础上，通过增加机组出力或者开启新机组的方式来调整缺额机组的出力，因此缺额机组的状态可以是“1”或“0”。为了节省运行费用，缺额机组需要从优先级最高的机组开始调整。同样，将全时段分为首端时段、中间时段和末端时段分别进行调整。此时，机组出力可增加量不仅需要考虑机组出力边界约束，还要兼顾最小启停时间约束和爬坡约束的影响，具体调整过程见附录 G。

3.5　机组启动方式调整策略

在实际运营过程中，由于冷热启动费用的差异，需要合理地调整机组的启动方式。机组启动方式调整策略通过对机组不同启动方式的评估，判断在哪种启动方式更加经济合理，从而减少机组的运行费用，具体调整过程见附录 H。

上述所提启发式调整策略通过调整机组出力和启停状态，能够有效处理机组爬坡约束并优化机组出力，以应对高比例新能源接入等不确定因素所引发的净负荷大幅波动问题[23]，从而提高电力系统的灵活性和稳定性。

4　算例分析

为了验证所提方法的有效性，本文以 10、40、60、80、100 和 1 000 机组数据进行仿真分析[19]。基于优先顺序法的启发式调整策略的流程图如图 2 所示。为了方便描述，记方法 1 和方法 2 分别为含有爬坡约束机组调整策略 1 和策略 2 的优先顺序法。其中，切负荷惩罚系数为 10 000 元/MW[24]，旋转备用取系统总负荷的 10%。利用 Intel(R) Core (TM)i5-13500HX、2.50 GHz、16 GB 内存的电脑和 Python 语言实现编程计算。

4.1　10 机组仿真结果分析

本节以 10 机组展示基于优先顺序法的启发式策略调整过程，分别对机组出力、启停状态、运行费用和求解时间进行分析。10 机组开/停机功率速度限制和上/下爬坡率的具体数据见附录 I 表 I1，所得初始解、近似解以及在策略 1、策略 2、方法 1 和方法 2 下得到的解的具体数据见附录 I。所有机组出力变化曲线及调整说明详见附录 J，本节则选取机组 4 和机组 5 来展示调整过程。

4.1.1　机组出力和启停状态调整结果分析

首先进行机组排序，排序后的机组顺序为机组 1、2、4、3、5、6、7、8、9、10。接下来基于此顺序，在满足系统功率平衡约束、旋转备用约束和机组出力边界约束的条件下生成初始解。图 3 为 10 机组系统在 24 h 内的净负荷变化曲线。从图 3 中可以看出，净负荷在 12:00 达到峰值 1 500 MW，在 01:00 为峰谷 700 MW，峰谷差达 800 MW。同时，净负荷在 01:00—12:00 和 17:00—20:00 呈现持续上升趋势，在 12:00—17:00 和 20:00—24:00 呈现持续

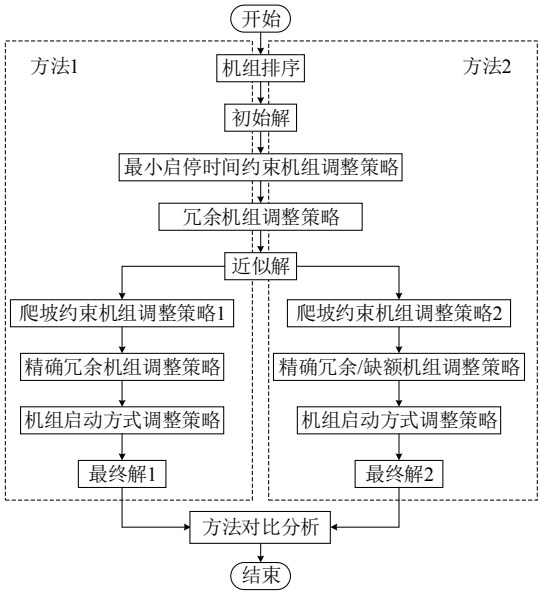


图 2　启发式调整策略流程图

Fig.2　Heuristic adjustment strategy flowchart

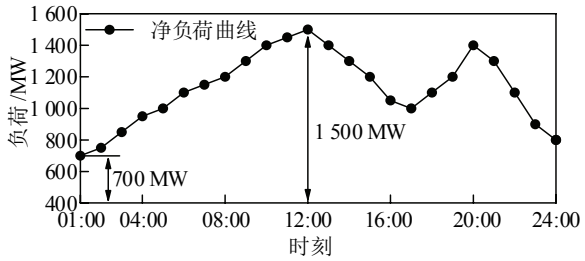


图 3 净负荷变化曲线

Fig.3 Curve of net load variation

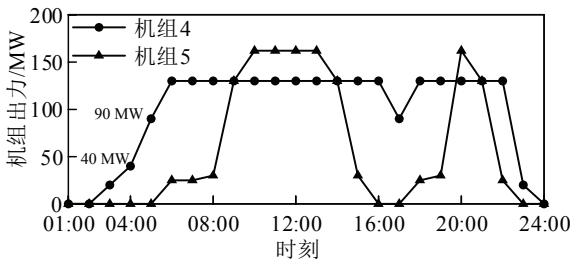


图 4 机组出力曲线(初始解)

Fig.4 Unit generation output (initial solution)

下降趋势，波动明显。净负荷的剧烈波动容易导致初始解违反最小启停时间约束和爬坡约束。如图 4 所示，从机组启停状态上看，初始解中机组 5 的最小停机时间为 6 h，但是在 17:00 的停机时间仅 2 h，违反了最小启停时间约束。从机组出力变化上看，机组 4 在 05:00 的出力为 90 MW，比 04:00 增加了 50 MW，而上爬坡率为 26 MW，违反了爬坡约束。同理，机组 4 在 06:00、17:00—18:00 和 23:00 违反了爬坡约束；机组 5 在 09:00、15:00、20:00 和 22:00 违反了爬坡约束。下面将利用启发式调整策略调整机组满足机组组合的约束条件。

如图 5 所示，利用最小启停时间约束机组调整策略，近似解中机组 5 在 16:00、17:00 开机，满足了最小启停时间约束。然而，近似解依然存在违反爬坡约束的情况。机组 4 在 05:00 时的机组出力为 70 MW，比 04:00 时增加了 50 MW，违反了爬坡约束。同理，机组 4 在 06:00、16:00—18:00 和 22:00—23:00 违反了爬坡约束；机组 5 在 09:00—10:00、14:00—15:00 和 20:00—22:00 违反了爬坡约束。

针对近似解中违反爬坡约束的情况，下面将利用机组爬坡约束启发式调整策略进行调整，经爬坡约束机组调整策略 1 和方法 1 调整后的机组出力曲线如图 6、7 所示。由图 6 可知，策略 1 调整后，机组 4 在第 4、5 时刻的机组出力分别增加为 78、104 MW，满足了爬坡约束。同理，机组 4 增加了 03:00—05:00、16:00—17:00 和 22:00—23:00 的出力。机组 5 增加了 06:00—09:00、14:00—19:00 和 21:00—22:00 的出力，满足了整个时段的爬坡约束。这说明通过爬坡约束机组调整策略 1 解决了机组出力波动较大、违反爬坡约束的问题，使机组出力变化更加平缓，机组的爬坡情况得到了明显改善。由图 7 可知，经精确冗余机组调整策略、机组启动方式调整策略调整后，机组 4 在 05:00 出力减少为 78 MW，减少了冗余出力。同理，机组 4 减少了

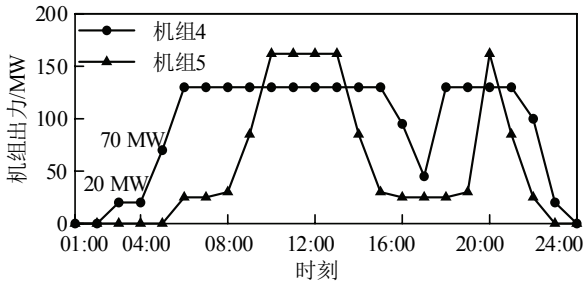


图 5 机组出力曲线(近似解)

Fig.5 Unit generation output (approximate solution)

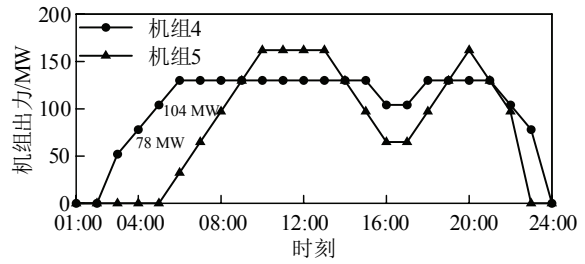


图 6 机组出力曲线(策略 1)

Fig.6 Unit generation output (strategy 1)

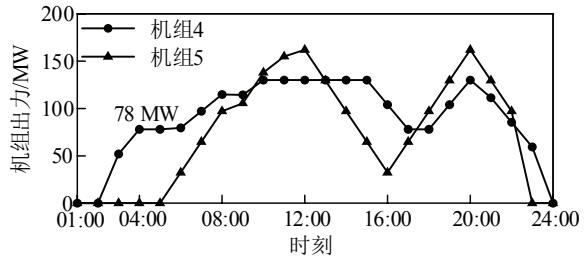


图 7 机组出力曲线(最终解 1)

Fig.7 Unit generation output (final solution 1)

06:00—09:00、17:00—19:00、21:00—23:00 的冗余出力；机组 5 减少了 09:00—11:00、13:00—16:00 的冗余出力。这说明，最终解 1 不仅满足了爬坡约束的要求，而且减少了冗余机组的出力，从而降低了机组运行费用。

经爬坡约束机组调整策略 2 和方法 2 调整后的

机组出力曲线如图 8、9 所示，由图 8 可知，策略 2 调整后，机组 4 在 05:00 的机组出力减少为 46 MW，满足了爬坡约束。同理，机组 4 减少了 05:00—08:00、18:00 的出力，增加了 16:00—17:00、22:00—23:00 的出力；机组 5 减少了 09:00—12:00、20:00 的出力，增加了 14:00—17:00、22:00 的出力，满足了整个时段的爬坡约束。相比于策略 1，策略 2 不仅解决了机组出力波动较大、违反爬坡约束的问题，而且使得机组出力变化更加平缓。但是由于某些时刻机组出力的减少，难免会有切负荷的产生。由图 9 可知，经精确冗余/缺额机组调整策略、机组启动方式调整策略调整后，机组 5 在 08:00 时刻出力由图 8 中的 30 MW 增加为 44 MW，增加了缺额出力。同理，机组 4 减少了 14:00 的冗余出力，机组 5 减少了 13:00—17:00 的冗余出力，增加了 06:00—12:00、18:00—20:00 的缺额出力。总体来看，最终解 2 不仅满足了爬坡约束的要求，而且减少了冗余机组出力，增加了缺额机组出力，从而降低了机组运行费用。

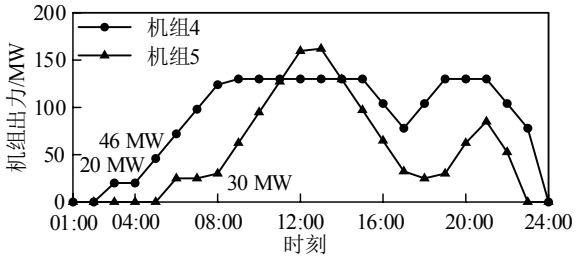


图 8　机组出力曲线(策略 2)

Fig.8　Unit generation output (strategy 2)

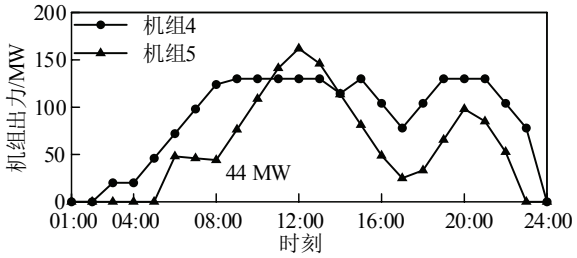


图 9　机组出力曲线(最终解 2)

Fig.9　Unit generation output (final solution 2)

4.1.2　运行费用和求解时间分析

2 种方法的运行费用和求解时间如表 4 所示。其中 2 种方法的求解时间包括了初始解、近似解和最终解的生成时间。由表 4 可知，方法 2 的切负荷惩罚成本近乎为 0，说明缺额机组调整良好，几乎没有切负荷的产生。与方法 2 相比，方法 1 在燃料成本上节省了 2 438.69 元，开机成本上减少了 60.00 元，总运行费用降低了 2 498.69 元，但是求解时间多了 0.29 s。总体来看，在 10 机组中，方法 1 在运行费用上优于方法 2，求解时间上稍微逊色于方法 2。

表 4　运行费用和求解时间

Table 4　Operation costs and solving times

参数	不同方法下的参数取值	
	方法 1	方法 2
总运行成本/元	567 995.03	570 493.72
开机成本/元	3 540.00	3 600.00
切负荷惩罚成本/元	—	0.000 000 003 41
燃料成本/元	564 455.03	566 893.72
初始解/s	0.16	0.16
求解时间/s	0.67	0.38

4.2　多机组仿真结果分析

本节以 10、40、60、80、100 和 1 000 机组数据进行仿真分析。设置了 3 种求解方案：一是直接利用方法 1 和方法 2 进行直接求解；二是利用商业优化求解器 Gurobi11.0.1 对不含爬坡约束的机组组合问题进行求解，并与方法 1 和方法 2 相结合求解，得到含爬坡约束机组组合问题的解；三是利用商业优化求解器 Gurobi11.0.1 进行直接求解。

各个算例中每个方法的运行费用和求解时间如表 5 和表 6 所示。其中 Gurobi-1 和 Gurobi-2 分别表示 Gurobi11.0.1 与方法 1 和方法 2 相结合的方案。由表 5 和表 6 可知，由于 Gurobi 对 1 000 机组的求解时间过长，未得到机组组合的运行费用。对比方法 1 和方法 2 的结果可知，在 10、60、80 机组中，方法 1 比方法 2 的运行费用分别减少了 2 498.69 元、122.63 元和 1 488.29 元。在 40、100 和 1 000 机组中，方法 1 比方法 2 的运行费用分别增加了 412.52 元、618.17 元和 26 250.19 元。这说明，方法 2 对缺额机组基本可以做到完全调节，并且在一些多机组系统中其运行费用比方法 1 更低。需要指出的是，如果方法 2 在调整过程中产生了大量的切负荷，导致切负荷惩罚成本过高，则建议改用方法 1 进行调整。在 10、40、60、80、100 和 1 000 机组中，方法 1 比方法 2 的求解时间分别增加了 0.29、0.20、0.30、0.31、0.45、3.91 s。方法 1 在求解时间上稍逊于方法 2。这主要是因为爬坡约束机组调整策略 1 需要在“1”型时段和“0”型时段调整，策略 2 只需要在“1”型时段调整。相比于策略 2，策略 1 的调整过程相对比较繁琐，导致方法 1 的求解时间较长。

表 5 运行费用对比

Table 5 Comparison of operation costs

机组	不同方法下的运行费用/元				
	方法 1	方法 2	Gurobi-1	Gurobi-2	Gurobi
10	567 995.03	570 493.72	565 290.50	573 238.25	564 635.89
40	2 263 764.25	2 263 351.73	2 246 661.44	2 261 942.19	2 242 542.65
60	3 390 003.25	3 390 125.88	3 370 631.70	3 390 478.82	3 359 744.70
80	4 521 514.75	4 523 003.04	4 487 653.19	4 496 938.21	4 479 704.91
100	5 652 990.45	5 652 372.28	5 606 224.29	5 612 657.90	5 596 616.30
1 000	56 479 531.50	56 453 281.31	—	—	—

表 6 求解时间对比

Table 6 Comparison of solving times

机组	不同方法下的求解时间/s				
	方法 1	方法 2	Gurobi-1	Gurobi-2	Gurobi
10	0.67	0.38	1.02	0.64	1.13
40	0.49	0.29	32.89	32.39	38.12
60	0.65	0.35	42.57	41.96	636.78
80	0.72	0.41	2 456.88	2 455.99	5 671.65
100	0.88	0.43	3 232.43	3 230.79	15 827.95
1 000	7.08	3.17	>24 h	>24 h	>24 h

对比 3 种求解方案可知，在 10、40、60、80 和 100 机组中，方法 1 比 Gurobi 直接求解的运行费用分别增加了 3 359.14 元、21 221.60 元、30 258.55 元、41 809.84 元和 56 374.15 元，Gurobi-1 比 Gurobi 直接求解的运行费用分别增加了 654.61 元、4 118.79 元、10 887.00 元、7 948.28 元和 9 607.99 元，这说明采用 Gurobi 与方法 1 相结合的方案可以有效缩小与 Gurobi 直接求解的运行费用之差，提高求解精度；方法 2 比 Gurobi 直接求解的运行费用分别增加了 5 857.83 元、20 809.08 元、30 381.18 元、43 298.13 元和 55 755.98 元，Gurobi-2 比 Gurobi 直接求解的运行费用分别增加了 8 602.36 元、19 399.54 元、30 734.12 元、17 233.30 元和 16 041.60 元。除了 10 机组和 60 机组外，Gurobi 与方法 2 相结合的方案均有效缩短了与 Gurobi 直接求解的运行费用之差，提高了求解精度。

在求解时间上，在 10、40、60、80 和 100 机组中，方法 1 比 Gurobi 直接求解的求解时间分别减少了 0.46、37.63、636.13、5 670.93、15 827.07 s，Gurobi-1 比 Gurobi 直接求解的求解时间分别减少了 0.11、5.23、594.21、3 214.77、12 595.52 s，方法 2 比 Gurobi 直接求解的求解时间分别减少了 0.75、37.83、636.43、5 671.24、15 827.52 s，Gurobi-2 比 Gurobi 直接求解的求解时间分别减少了 0.49、5.73、594.82、3 215.66、12 597.16 s。这说明，方法 1 和方法 2 的求解效率远比 Gurobi 直接求解效率更高；同时 Gurobi-1 和 Gurobi-2 的求解效率比 Gurobi 直接求解的效率高，但比方法 1 和方法 2 直接求解效率低。

综合来看，方法 1 和方法 2 在求解精度上稍逊于 Gurobi 直接求解，但在求解时间上具有明显的优势，尤其在处理大规模机组问题时，方法 1 和方法 2 的计算效率远高于 Gurobi 直接求解。Gurobi 与方法 1 结合求解的方案在求解精度上比方法 1 直接求解更高。在 40、80 和 100 机组中，Gurobi 与方法 2 结合求解的方案在求解精度上比方法 2 直接求解，更高。在求解时间上，Gurobi 与方法 1 和方法 2 结合求解方案的计算效率远低于方法 1 和方法 2，但高于 Gurobi 直接求解的效率。因此在面对不同系统时，可以根据具体的实际需要，选择合适的求解方案。

5 结论

1）本文所提基于优先顺序法的机组爬坡约束调整策略，通过启发式地调整机组出力和启停状态，满足了爬坡约束的要求，提高了所得机组调度方案解的质量，保证了电力系统安全稳定运行。

2）本文在优先顺序法的基础上集成了最小启停时间约束机组调整策略、冗余机组调整策略、爬坡约束机组调整策略、精确/缺额机组调整策略和机组启动方式调整策略，构建了一套高效的机组调度求解框架来求解机组调度问题。在牺牲部分精度的基础上，快速给出了机组启停和出力方案，以满足机组调度的时间要求。

考虑新能源出力不确定性和线路传输约束对机组调度的影响，后续将研究计及新能源出力和安全约束的机组调度问题，以提升电力系统的经济性和安全性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 韩　煜，胡　博，苏一帆，等. 考虑机组调峰寿命损耗的电力系统可靠性约束日内滚动调度[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-14[2025-05-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20241227.1710.016. html.
HAN Yu, HU Bo, SU Yifan, et al. Reliability-constrained intra-day rolling dispatch of power system considering peaking generating units life loss[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-14[2025-05-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM. 20241227.1710.016. html.

[2] 周文毅，高红均，郭明浩，等. 考虑历史数据筛选及关键断面约束的电力系统运行灵活性评估方法[J]. 高电压技术，2025，51(1)：180-190.
ZHOU Wenyi, GAO Hongjun, GUO Minghao, et al. Operational flexibility evaluation method of power system considering historical data screening and key section constraints[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 180-190.

[3] 王　杰，苗世洪，王廷涛，等. 基于近端策略优化算法的电力系统多类型储能爬坡功率分配策略[J/OL]. 高电压技术，2025：1-16[2025-05-25]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20241943.
WANG Jie, MIAO Shihong, WANG Tingtao, et al. Ramping power allocation strategy for multi-type energy storage in power system based on proximal policy optimization[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-16[2025-05-25]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20241943.

[4] 郭俊劭，王明强，韩学山，等. 考虑自适应前瞻时间尺度的动态经济调度[J]. 电力系统自动化，2025，49(9)：107-113.
GUO Junshao, WANG Mingqiang, HAN Xueshan, et al. Dynamic economic dispatch considering adaptive look-ahead time scale[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(9): 107-113.

[5] 杨　雪，王明强，胡召永，等. 精细考虑时刻间净负荷波动不确定性的机组组合[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4839-4848.
YANG Xue, WANG Mingqiang, HU Zhaoyong, et al. Unit commitment considering fluctuation uncertainty of net load between adjacent periods[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4839-4848.

[6] 陈咏涛，王瑞妙，樊晓伟，等. 考虑碳排放强度约束和负荷转移的风火打捆发电系统经济调度模型[J]. 电工电能新技术，2024，43(9)：33-40.
CHEN Yongtao, WANG Ruimiao, FAN Xiaowei, et al. An economic dispatch model of wind-thermal-bundled generation system considering carbon emission constraint and load transfer strategy[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(9): 33-40.

[7] 朱建全，朱文凯，刘海欣，等. 近似动态规划在电力系统优化运行中的应用综述[J]. 电力系统自动化，2024，48(22)：1-21.
ZHU Jianquan, ZHU Wenkai, LIU Haixin, et al. Overview on application of approximate dynamic programming in optimal operation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(22): 1-21.

[8] 张大海，孙　锴，史一茹，等. 考虑灵活资源及模数驱动方法的电力系统调度方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：42-54.
ZHANG Dahai, SUN Kai, SHI Yiru, et al. Overview of power system dispatching methods considering flexible resources and model-data driven[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 42-54.

[9] 张玉敏，杨子震，叶平峰，等. 市场环境下考虑配网重构和需求响应的输配协同优化调度[J/OL]. 高电压技术，2024：1-15[2025-05-25]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20240170.
ZHANG Yumin, YANG Zizhen, YE Pingfeng, et al. Collaborative optimization scheduling of transmission and distribution considering distribution network reconfiguration and demand response in market environment[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-15 [2025-05-25]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240170.

[10] 许泽凯，和敬涵，刘　婴，等. 基于耦合约束解耦的虚拟电厂动态可行域求解方法[J]. 中国电机工程学报，2024，44(9)：3440-3451.
XU Zekai, HE Jinghan, LIU Zhao, et al. Solution method of virtual power plant dynamic feasible region based on decoupling of coupling constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3440-3451.

[11] 苏　珈，姜海鹏，江晓东，等. 计及时序特征的电力系统多时段静态安全域模型及刻画方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报，2024：1-14[2025-05-25]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013. pcsee.241240.
SU Jia, JIANG Haipeng, JIANG Xiaodong, et al. The multi-period static security region model and characterization method for power system considering timing characteristics[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-14[2025-05-25]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013. pcsee. 241240.

[12] 杨　楠，郝俊聪，产雪振，等. 数据驱动的考虑安全约束机组组合问题研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3654-3668.
YANG Nan, HAO Juncong, CHAN Xuezhen, et al. Review of data-driven security-constrained unit commitment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3654-3668.

[13] ELSAYED A M, MAKLAD A M, FARRAG S M. Three-stage priority list unit commitment for large-scale power systems considering ramp rate constraints[J]. IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021, 44(3): 329-342.

[14] 杨　乐. 含风电电力系统经济调度问题及其求解方法研究[D]. 沈阳：东北大学，2021.
YANG Le. Research on optimal dispatching problem of wind power integrated power system and its solving algorithms[D]. Shenyang, China: Northeastern University, 2021.

[15] SENJYU T, SHIMABUKURO K, UEZATO K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 882-888.

[16] 张晨玉. 求解机组组合问题的启发式方法研究[D]. 郑州：河南工业大学，2024.
ZHANG Chenyu. Research on heuristic method for solving unit commitment problem[D]. Zhengzhou, China: Henan University of Technology, 2024.

[17] 黎静华，兰　飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(2)：1-7.
LI Jinghua, LAN Fei. Extended priority list method for unit commitment problem[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 1-7.

[18] 王　剑，刘天琪，刘学平. 基于优先级排序和内点法的机组优化组合[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(13)：55-60.
WANG Jian, LIU Tianqi, LIU Xueping. Unit commitment optimization based on priority list and interior point methods[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 55-60.

[19] QUAN R, JIAN J B, YANG L F. An improved priority list and neighborhood search method for unit commitment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 67: 278-285.

[20] DHALIWAL J S, DHILLON J S. Profit based unit commitment using memetic binary differential evolution algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2019, 81: 105502.

[21] 崔一阳，潘斗南，黎灿兵，等. 大规模电网机组组合状态迭代路径搜索优化方法[J]. 上海交通大学学报，2025，59(6)：711-719.
CUI Yiyang, PAN Dounan, LI Canbing, et al. An optimization method for iteration path search of large-scale power grid unit commitment state[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2025, 59(6): 711-719.

[22] 黎静华，韦　化. 求解机组组合问题的领域搜索法[J]. 中国电机工程学报，2008，28(13)：33-40.
LI Jinghua, WEI Hua. Unit commitment via local search point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 33-40.

[23] 石新聪，郭创新，王玮茹，等. 考虑新能源参与的灵活爬坡容量分区优化[J]. 高电压技术，2025，51(11)：5380-5387.
SHI Xincong, GUO Chuangxin, WANG Weiru, et al. Zonal flexible ramping capacity optimization considering the participation of renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(11): 5380-5387.

[24] SOROUDI A. Power system optimization modeling in GAMS[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2017: 171.



王广宏
2000—，男，硕士生
主要从事电力系统机组组合优化方面的研究工作
E-mail: 17865840660@163.com

WANG Guanghong



李冠冠
1989—，男，博士，讲师，硕导
主要从事多微网运行优化、电力市场与能源交易方面的研究工作
E-mail: guanguanli@sdut.edu.cn

LI Guanguan
Ph.D.



彭　克(通信作者)
1983—，男，博士，教授，博导
主要从事交直流配电系统与综合能源系统的研究工作
E-mail: pengke@sdut.edu.cn

PENG Ke
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-03-11　在线出版日期　2025-07-17　　编辑　程子丰

附录 A

初始解的生成过程如下：

首先，根据机组优先顺序在考虑旋转备用约束的基础上确定机组的启停状态。假设所有机组在每个时刻的启停状态都为“0”，过程如下：

①令 $t=1$。

②令 $g=1$(排序后的第一个机组)。

③令 $P_{\text{total}}^{\max}=0$，$P_{\text{total}}^{\max}$ 为开机机组的最大值之和。

④令 $P_{\text{total}}^{\max}:=P_{\text{total}}^{\max}+P_g^{\max}$。

⑤若 $P_{\text{total}}^{\max}<L_t+P_t^{\text{R}}$，则有：

$$u_{g,t}=1 \tag{A1}$$

$g:=g+1$，若 $g\le N_{\text{G}}^{*}$（$g\le N_{\text{G}}^{*}$ 表示排序后的最后一个机组)转④，否则转⑥。

若 $P_{\text{total}}^{\max}\ge L_t+P_t^{\text{R}}$，则有：

$$u_{g,t}=1 \tag{A2}$$

转⑥。

⑥$t:=t+1$，若 $t\le N_{\text{T}}$，转②，否则结束。

然后，根据机组的启停状态在考虑系统功率平衡约束和机组出力边界约束的基础上进一步确定开机机组的功率。假设所有机组在各个时刻的出力都为 0，过程如下：

①令 $t=1$。

②令 $g=1$。

③令 $P_{\text{total}}=0$，P_{total} 为开机机组的功率之和。

④若 $u_{g,t}=0$，转⑥，否则：

$$P_{\text{total}}:=P_{\text{total}}+P_g^{\max} \tag{A3}$$

若 $P_{\text{total}}\le L_t$，则有：

$$P_{g,t}=P_g^{\max} \tag{A4}$$

转⑤；

若 $P_{\text{total}}>L_t$，则有：

$$P_{g,t}=\min[P_g^{\min},L_t-(P_{\text{total}}-P_g^{\max})] \tag{A5}$$

转⑥。

⑤$g:=g+1$，若 $g\le N_{\text{G}}^{*}$，转④；否则转⑥。

⑥$t:=t+1$，若 $t\le N_{\text{T}}$，转②，否则结束。

附录 B

如图 B1 所示，基于优先顺序法的启发式调整策略分三个阶段对机组进行调整。第一，通过对机组进行排序，在考虑系统功率平衡约束、旋转备用约束和机组出力边界约束的基础上得到了机组组合问题的初始解。第二，在不考虑机组爬坡约束阶段，利用最小启停时间约束机组调整策略和冗余机组调整策略对初始解进行调整。首先，利用最小启停时间约束机组调整策略对机组启停时间进行修正，以满足最小启停时间约束。然后，利用冗余机组调整策略在满足系统功率平衡约束、机组出力边界约束、旋转备用约束和最小启停时间约束的基础上减少冗余机组出力，得到近似解。第三，在考虑机组爬坡约束阶段，利用机组爬坡约束启发式调整策略，包括爬坡约束机组调整策略、精确冗余/缺额机组调整策略和机组启动方式调整策略，在满足系统功率平衡约束、机组出力边界约束、旋转备用约束和最小启停时间约束的基础上，对近似解进行调整，最后得到满足爬坡约束的最终解。

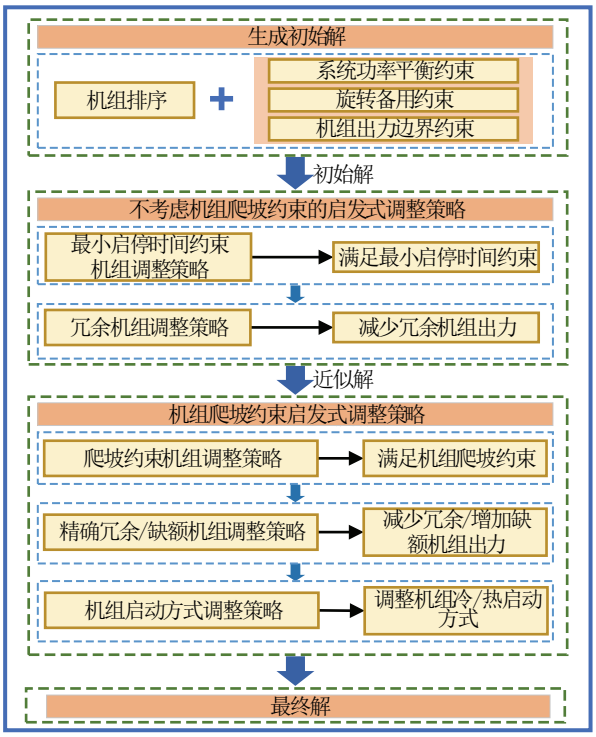


图 B1　启发式调整策略框图

Fig.B1　Heuristic adjustment strategy flowchart

附录 C

冗余机组调整策略的具体过程如下：

①令 $t=1$。

②计算 t 时刻总冗余出力 R_t，则有：

$$R_t=\sum_{g=1}^{N_{\text{G}}}P_{g,t}-L_t \tag{C1}$$

③令 $g=N_{\text{G}}^{*}$。

④令机组出力可减少量 $P_{\text{less}}=0$，机组出力总减少量 $\Delta P=0$。

⑤计算机组出力可减少量，即：

$$P_{\text{less}} = \max(P_{g,t} - P_g^{\min}, 0) \tag{C2}$$

⑥若 $\Delta P + P_{\text{less}} \le R_t$，则有：

$$\Delta P := \Delta P + P_{\text{less}} \tag{C3}$$

$$P_{g,t} := P_{g,t} - P_{\text{less}} \tag{C4}$$

$g := g - 1$，若 $g \ge 1$，转⑤；否则转⑦；

若 $\Delta P + P_{\text{less}} > R_t$，则有：

$$P_{g,t} := P_{g,t} - (R_t - \Delta P) \tag{C5}$$

转⑦。

⑦$t := t + 1$，若 $t \le N_{\text{T}}$，转②，否则结束。

在冗余机组调整过程中，首先从第一时刻开始，计算该时刻总的冗余出力。然后，从优先级最低的机组开始，在考虑机组出力边界约束的基础上计算该机组最多可减少的出力 P_{less}。若机组出力总的减少量 ΔP 加上 P_{less} 小于总冗余出力，说明该机组减少 P_{less} 后，总的冗余出力未降为 0，仍然存在冗余。此时将该机组出力减少 P_{less}，并将机组出力总的减少量更新为原 ΔP 加上 P_{less}。然后，按照机组逆序顺序，继续计算下一个机组的 P_{less}。若 ΔP 加上 P_{less} 大于总的冗余出力，说明至该机组为止的总出力减少量已经超过了总冗余出力。此时该机组出力无需减少 P_{less}，只需要减少总冗余出力减去 ΔP 的量即可。接着，计算下一时刻的总冗余出力，并重复上述过程，直到最后一刻。

附录 D

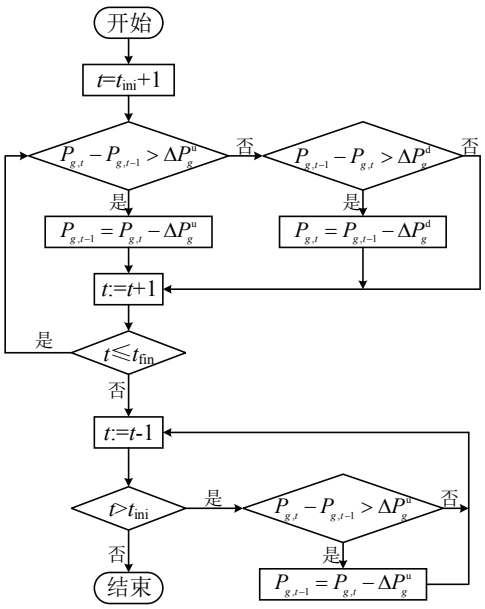


图 D1 “顺时增大、逆时检验”流程图

Fig.D1 Flowchart of “clockwise increase and reverse time test”

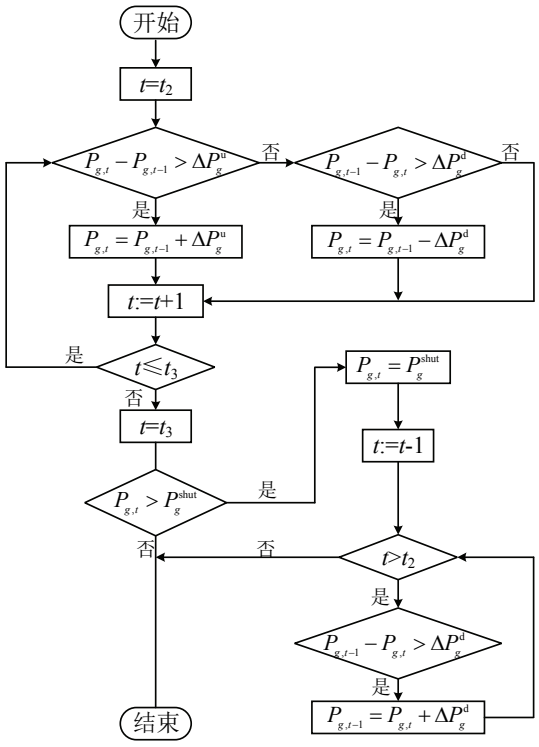


图 D2 “顺时调整、逆时减少”流程图

Fig.D2 Flowchart of “clockwise adjust and reverse time decrease”

附录 E

在爬坡约束调整策略 1 的基础上，针对启停机组的具体过程如下：启停机组全时段同时包含“1”型时段和“0”型时段。“0”型时段中可能包含首端时刻(01:00)、末端时刻(24:00)或者仅包含中间时刻(02:00—23:00)如表 E1 所示。由表 E1 可知，全时段中含有 3 个“0”型时段和 2 个“1”型时段。

表 E1 机组全时段启停状态

Table E1 Unit full-time up/down status

时刻	机组状态
01:00—t_1	0
t_2—t_3	1
t_4—t_5	0
t_6—t_7	1
t_8—24:00	0

在启停机组的调整过程中，不仅需要增加“1”型时段的机组出力，还可能对“0”型时段某些时刻的机组状态进行调整，因此还需要考虑最小启停时间约束的影响。首先对“1”型时段采取“顺时增大、逆时检验”的方法调整机组出力以满足爬坡约束。然后分别对含有首端时刻、末端时刻和仅含有中间

时刻的“0”型时段进行调整，过程如下：

1）首端时刻

当“0”型时段含有首端时刻时，需要调整“0”型时段右端时刻的机组出力和启停状态。以表 E1 为例，调整过程为：

①令 $t=t_1$。

②若 $P_{g,t+1}>P_g^{\text{start}}$，则有：

$$P_{g,t}=\max(P_{g,t+1}-\Delta P_g^{\text{u}},P_g^{\min}) \tag{E1}$$

$$u_{g,t}=1 \tag{E2}$$

转③，否则结束调整。

③$t:=t-1$，若 $t\geq 1$，转②，否则结束调整。

2）末端时刻

当“0”型时段含有末端时刻时，需要调整“0”型时段左端时刻的机组出力和启停状态。以表 E1 为例，调整过程为：

①令 $t=t_8$。

②若 $P_{g,t-1}>P_g^{\text{shut}}$，则有：

$$P_{g,t}=\max(P_{g,t-1}-\Delta P_g^{\text{d}},P_g^{\min}) \tag{E3}$$

$$u_{g,t}=1 \tag{E4}$$

转③，否则结束调整。

③$t:=t+1$，若 $t\leq N_{\text{T}}$，转②，否则结束调整。

3）中间时刻

当“0”型时段仅包含中间时刻时，需要同时调整“0”型时段左右两端时刻的机组出力和启停状态。以表 E1 为例：

“0”型时段左端时刻调整：

①令 $t=t_4$。

②若 $P_{g,t-1}>P_g^{\text{shut}}$，则有：

$$P_{g,t}=\max(P_{g,t-1}-\Delta P_g^{\text{d}},P_g^{\min}) \tag{E5}$$

$$u_{g,t}=1 \tag{E6}$$

转③，否则结束调整。

③$t:=t+1$，若 $t\leq t_5$，转②，否则结束调整。

“0”型时段右端时刻调整：

①令 $t=t_5$。

②若 $P_{g,t+1}>P_g^{\text{start}}$，则有：

$$P_{g,t}=\max(P_{g,t+1}-\Delta P_g^{\text{u}},P_g^{\min}) \tag{E7}$$

$$u_{g,t}=1 \tag{E8}$$

转③，否则结束调整。

③$t:=t-1$，若 $t\geq t_4$，转②，否则结束调整。

两端调整结束后，统计此时“0”型时段机组的停机时长 t_{off}。如图 E1 所示。若 $t_{\text{off}}\geq T_g^{\text{off}}$，表示该“0”型时段仍满足最小停机时间约束，调整结束；若 $t_{\text{off}}<T_g^{\text{off}}$，表示该“0”型时段不能满足最小停机时间约束。为了维持系统功率平衡，把该“0”型时段与前后“1”型时段合为一个“1”型时段，即 t_2-t_7 时段合为“1”型时段。最后，采取“顺时增大，逆时检验”的方法对新形成的“1”型时段进行调整以满足爬坡约束。

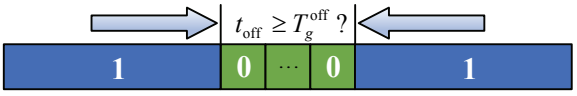


图 E1　统计停机时长

Fig.E1　Statistics period of shutdown

附录 F

精确冗余机组调整策略的具体调整过程如下：

1）首端时段

①令 $t=1$。

②计算首端时刻的总冗余出力，即：

$$R_t=\sum_{g=1}^{N_{\text{G}}}P_{g,t}-L_t \tag{F1}$$

③令 $g=N_{\text{G}}^*$。

④令 $P_{\text{less}}=0$，$\Delta P=0$。

⑤计算机组出力可减少量，即：

$$P_{\text{less}}=\max[0,P_{g,t}-\max(P_{g,t+1}-\Delta P_g^{\text{u}},P_g^{\min})] \tag{F2}$$

⑥若 $\Delta P+P_{\text{less}}\leq R_t$，则有：

$$\Delta P:=\Delta P+P_{\text{less}} \tag{F3}$$

$$P_{g,t}:=P_{g,t}-P_{\text{less}} \tag{F4}$$

$g:=g-1$，若 $g\geq 1$，转⑤，否则结束调整。

若 $\Delta P+P_{\text{less}}>R_t$，则有：

$$P_{g,t}:=P_{g,t}-(R_t-\Delta P) \tag{F5}$$

结束调整。

2）中间时段

①令 $t=2$。

②计算 t 时段的总冗余出力，即：

$$R_t=\sum_{g=1}^{N_{\text{G}}}P_{g,t}-L_t \tag{F6}$$

③令 $g=N_{\text{G}}^*$。

④令 $P_{\text{less}}=0$，$\Delta P=0$。

⑤计算机组出力可减少量，即：

$$P_{\text{less}}=\max[0,P_{g,t}-\max(P_{g,t-1}-\Delta P_g^{\text{d}},P_{g,t+1}-\Delta P_g^{\text{u}},P_g^{\min})] \tag{F7}$$

⑥若 $\Delta P + P_{\text{less}} \le R_t$，则有：

$$\Delta P \coloneqq \Delta P + P_{\text{less}} \tag{F8}$$

$$P_{g,t} \coloneqq P_{g,t} - P_{\text{less}} \tag{F9}$$

$g \coloneqq g - 1$，若 $g \ge 1$，转⑤；否则转⑦。

若 $\Delta P + P_{\text{less}} > R_t$，则有：

$$P_{g,t} \coloneqq P_{g,t} - (R_t - \Delta P) \tag{F10}$$

转⑦。

⑦$t \coloneqq t + 1$，若 $t \le N_{\text{T}} - 1$，转②，否则结束。

3）末端时段

机组 g 末端时刻与首端时段的调整过程同理，只需考虑末端时段的左端时刻机组的出力即可，与首端时段调整过程相似。

在上述调整之后，各个时刻机组出力之和已经固定。为了更好地降低机组运行费用，在考虑机组出力边界约束和爬坡约束的基础上通过增加优先机组出力，并相应减少非优先机组出力的方式对各个时刻机组之间出力进行更加细致的调整。同样，将全时段分为首端时段、中间时段和末端时段分别进行调整。由于首端时段和末端时段仅受一端相邻时刻机组爬坡约束的影响，可以结合下面中间时段的调整过程进行调整，中间时段的具体调整过程如下：

①令 $t = 2$。

②令 $g = 1$。

③若 $u_{g,t} = 0$，转⑨，否则：

$$P_{\text{up}} = \min(P_{g,t-1} + \Delta P_g^{\text{u}}, P_{g,t+1} + \Delta P_g^{\text{d}}, P_g^{\max}) - P_{g,t} \tag{F11}$$

P_{up} 为优先机组出力最大可增加量。

④令非优先机组出力最大可减少量 $P_{\text{down}} = 0$，非优先机组功率的总减少量 $\Delta P_{\text{down}} = 0$。

⑤令 $i = N_{\text{G}}^*$。

⑥若 $u_{i,t} = 1$，则有：

$$P_{\text{down}} = P_{i,t} - \max(P_{i,t-1} - \Delta P_i^{\text{d}}, P_{i,t+1} - \Delta P_i^{\text{u}}, P_i^{\min}) \tag{F12}$$

否则转⑧。

⑦若 $\Delta P_{\text{down}} + P_{\text{down}} \le P_{\text{up}}$，则有：

$$P_{g,t} \coloneqq P_{g,t} + P_{\text{down}} \tag{F13}$$

$$P_{i,t} = \max(P_{i,t-1} - \Delta P_i^{\text{d}}, P_{i,t+1} - \Delta P_i^{\text{u}}, P_i^{\min}) \tag{F14}$$

$$\Delta P_{\text{down}} \coloneqq \Delta P_{\text{down}} + P_{\text{down}} \tag{F15}$$

转⑧；

若 $\Delta P_{\text{down}} + P_{\text{down}} > P_{\text{up}}$，则有：

$$P_{g,t} \coloneqq P_{g,t} + (P_{\text{up}} - P_{\text{down}}) \tag{F16}$$

$$P_{i,t} \coloneqq P_{i,t} - (P_{\text{up}} - P_{\text{down}}) \tag{F17}$$

转⑩。

⑧$i \coloneqq i - 1$，若 $i > g$，转⑥；否则转⑨。

⑨$g \coloneqq g + 1$，若 $g < N_{\text{G}}^*$，转③，否则转⑩。

⑩$t \coloneqq t + 1$，若 $t \le N_{\text{T}} - 1$，转②，否则结束。

在上述中间时段的调整过程中，首先从第二时刻开始，计算该时刻排序第一的机组 g 的出力最大可增加量 P_{up}。接着，从优先级最低的机组开始，计算非优先机组 i 最多可减少的出力 P_{down}。若非优先机组出力总的减少量 ΔP_{down} 加上 P_{down} 小于 P_{up}，说明优先机组增加 P_{down} 后，仍然存在可增加的空间。此时，机组 g 出力增加出力 P_{down}，机组 i 出力减少出力 P_{down}，非优先机组出力总的减少量更新为 ΔP_{down} 加上 P_{down}。然后，按照机组逆序顺序，继续计算下一个非优先机组的 P_{less}，直至非优先机组与优先机组为同一个机组。此时，调整下一个优先机组，直至机组排序的最后一个机组。若非优先机组出力总的减少量 ΔP_{down} 加上 P_{down} 大于 P_{up}，则优先机组 g 出力增加出力 $P_{\text{up}} - P_{\text{down}}$，非优先机组减少出力 $P_{\text{up}} - P_{\text{down}}$，转入下一个时刻，重复上述过程直至中间时段的最后时刻。

附录 G

精确缺额机组调整策略的具体调整过程如下：

1）中间时段

机组 g 在中间时段所有机组启停状态组合情况，如表 G1 所示。

表 G1　缺额机组中间时刻启停状态

Table G1　Up/down status of middle moment

时刻	机组状态							
	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6	组合 7	组合 8
t−1	0	0	1	1	0	0	1	1
t	1	1	1	1	0	0	0	0
t+1	0	1	0	1	0	1	0	1

①令 $t = 2$。

②令 $P_{\text{add}} = 0$，$\Delta P_{\text{add}} = 0$，计算 t 时刻总缺额出力，即：

$$\Delta R_t = L_t - \sum_{g=1}^{N_{\text{G}}} P_{g,t} \tag{G1}$$

式中：P_{add} 为最多可调节增量，ΔP_{add} 为调节增量。

③令 $g = 1$。

④若 $u_{g,t-1} = 0$，$u_{g,t} = 1$，$u_{g,t+1} = 0$，则有：

$$P_{\text{add}} = \min(P_g^{\text{start}}, P_g^{\text{shut}}, P_g^{\max}) - P_{g,t} \tag{G2}$$

若 $u_{g,t-1} = 0$，$u_{g,t} = 1$，$u_{g,t+1} = 1$，则有：

$$P_{\text{add}} = \min(P_g^{\text{start}}, P_{g,t+1} + \Delta P_g^{\text{d}}, P_g^{\max}) - P_{g,t} \tag{G3}$$

若 $u_{g,t-1} = 1$，$u_{g,t} = 1$，$u_{g,t+1} = 0$，则有：

$$P_{\text{add}}=\min(P_g^{\text{shut}},P_{g,t-1}+\Delta P_g^{\text{u}},P_g^{\max})-P_{g,t} \quad \text{(G4)}$$

若 $u_{g,t-1}=1$，$u_{g,t}=1$，$u_{g,t+1}=1$，则有：

$$P_{\text{add}}=\min(P_{g,t-1}+\Delta P_g^{\text{u}},P_{g,t+1}+\Delta P_g^{\text{d}},P_g^{\max})-P_{g,t} \quad \text{(G5)}$$

若 $u_{g,t-1}=0$，$u_{g,t}=0$，$u_{g,t+1}=0$，则有：

若 $T_g^{\text{on}}\le 1$：

$$P_{\text{add}}=\min(P_g^{\text{start}},P_g^{\text{shut}}) \quad \text{(G6)}$$

$$u_{g,t}=1 \quad \text{(G7)}$$

若 $u_{g,t-1}=0$，$u_{g,t}=0$，$u_{g,t+1}=1$，则有：

统计 $u_{g,t}$ 变为“1”后“0”型时段的剩余停机时间 T_{off}，若 $T_{\text{off}}\ge T_g^{\text{off}}$：

$$P_{\text{add}}=\min(P_g^{\text{start}},P_{g,t+1}+\Delta P_g^{\text{d}},P_g^{\max}) \quad \text{(G8)}$$

$$u_{g,t}=1 \quad \text{(G9)}$$

若 $u_{g,t-1}=1$，$u_{g,t}=0$，$u_{g,t+1}=0$，则有：

统计 $u_{g,t}$ 变为“1”后“0”型时段的剩余停机时间 T_{off}，若 $T_{\text{off}}\ge T_g^{\text{off}}$：

$$P_{\text{add}}=\min(P_g^{\text{shut}},P_{g,t-1}+\Delta P_g^{\text{u}},P_g^{\max}) \quad \text{(G10)}$$

$$u_{g,t}=1 \quad \text{(G11)}$$

若 $u_{g,t-1}=1$，$u_{g,t}=0$，$u_{g,t+1}=1$，则有：

$$P_{\text{add}}=\min(P_{g,t-1}+\Delta P_g^{\text{u}},P_{g,t+1}+\Delta P_g^{\text{d}},P_g^{\max}) \quad \text{(G12)}$$

⑤若 $\Delta P_{\text{add}}+P_{\text{add}}\le\Delta R_t$，则有：

$$\Delta P_{\text{add}}:=\Delta P_{\text{add}}+P_{\text{add}} \quad \text{(G13)}$$

$$P_{g,t}:=P_{g,t}+P_{\text{add}} \quad \text{(G14)}$$

$g:=g+1$，若 $g\le N_{\text{G}}^*$，转④；否则转⑦。

若 $\Delta P+P_{\text{add}}>\Delta R_t$，则有：

若 $P_{g,t}+(\Delta R_t-\Delta P_{\text{add}})<\max(P_{g,t-1}-\Delta P_g^{\text{d}},P_g^{\min},P_{g,t+1}-\Delta P_g^{\text{u}})$：

$$P_{g,t}:=P_{g,t}+P_{\text{add}} \quad \text{(G15)}$$

转⑥；

否则：

$$P_{g,t}:=P_{g,t}+(\Delta R_t-\Delta P_{\text{add}}) \quad \text{(G16)}$$

转⑥。

⑥$t:=t+1$，若 $t\le N_{\text{T}}-1$，转②，否则结束。

在上述中间时段的调整过程中，首先从第二时刻开始，计算该时刻的总缺额出力。然后，从排序第一的机组开始，计算该机组的最多可调节增量 P_{add}。需要注意，当缺额机组的状态为“0”时，P_{add} 的计算除了考虑机组出力边界约束和爬坡约束，还需考虑最小启停时间约束的影响。当缺额机组状态由“0”变为“1”后，需要判断所在“0”型时段是否还满足最小停机时间约束。若满足，则机组状态可以改变，并在考虑机组出力边界约束和爬坡约束的基础上计算 P_{add}；若不满足，则机组状态仍为“0”。

在计算 P_{add} 后，若机组出力总调节增量 ΔP_{add} 加上 P_{add} 小于总缺额出力，说明增加该机组出力后，总的缺额出力未降为 0，仍然存在缺额。此时将该机组出力增加 P_{add}，并将机组出力总调节增量更新为原 ΔP_{add} 加上 P_{add}。然后，按照机组排序顺序，继续计算下一个机组的 P_{add}。若 ΔP_{add} 加上 P_{add} 大于总缺额出力，则说明至该机组为止的总调节增加量已经超过了总缺额出力。在这种情况下，该机组出力无需增加 P_{add}。此时，需要判断机组增加总缺额出力减去 ΔP_{add} 的量后是否仍满足机组出力边界约束和爬坡约束。若不满足，则该机组出力增加 P_{add}。若满足，则该机组只需增加总缺额出力减去 ΔP_{add} 的量即可。计算下一刻的总缺额出力，并重复上述过程直至中间时段的最后一个时刻。

2）首端时段和末端时段

机组 g 在首端时段和末端时段所有机组启停状态组合情况，如表 G2 和表 G3 所示，可结合中间时段进行调整。

表 G2　缺额机组首端时刻启停状态

Table G2　Up/down status of initial moment

时刻	机组状态			
	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4
01:00	1	1	0	0
02:00	0	1	0	1

表 G3　缺额机组末端时刻启停状态

Table G3　Up/down status of finally moment

时刻	机组状态			
	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4
23:00	0	1	0	1
24:00	1	1	0	0

附录 H

机组启动方式调整策略的具体调整过程如下：以机组 g 为例，若 $T_{g,t}^{\text{off}}\le T_g^{\text{off}}+T_g^{\text{cold}}$：

$$C_{g,t}=C_g^{\text{hot}} \quad \text{(H1)}$$

若 $T_{g,t}^{\text{off}}>T_g^{\text{off}}+T_g^{\text{cold}}$，令 $K=T_{g,t}^{\text{off}}-(T_g^{\text{off}}+T_g^{\text{cold}})$，假设 $t-k$ (k=1, 2, …, K)时刻的机组开机，机组出力和启停状态以及开机后产生的燃料费用 F_{tem} 为：

$$P_{g,t-k}=\max(P_{g,t+1-k}-\Delta P_g^{\mathrm{u}},P_g^{\min}) \tag{H2}$$

$$u_{g,t-k}=1 \tag{H3}$$

$$F_{\mathrm{tem}}(P_{g,t-k})=\sum_{k=1}^{K}a_gP_{g,t-k}^2+b_gP_{g,t-k}+c_g \tag{H4}$$

若 $F_{\mathrm{tem}}(P_{g,t-k})+C_g^{\mathrm{hot}}<C_g^{\mathrm{cold}}$，则在 $t-k$ (k=1, 2, …, K)时刻的机组开机，机组出力和启停状态即为式(H2)和(H3)所示。同时，在 $t-K$ 时刻机组的启动方式为热启动，即：

$$C_{g,t-K}=C_g^{\mathrm{hot}} \tag{H5}$$

否则在 $t-k$ (k=1, 2, …, K)时刻的机组状态仍为“0”，机组启动方式为冷启动，即：

$$C_{g,t}=C_g^{\mathrm{cold}} \tag{H6}$$

附录 I

表 I1　机组爬坡参数

Table I1　Unit ramp rate parameter

MW

参数	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10
ΔP_g^{u}	91	91	26	26	32.4	16	17	11	11	11
ΔP_g^{d}	91	91	26	26	32.4	16	17	11	11	11
P_g^{start}	455	455	130	130	162	80	85	55	55	55
P_g^{shut}	455	455	130	130	162	80	85	55	55	55

表 I2　10 机组初始解

Table I2　10 units initial solution

MW

时刻	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10	负荷
01:00	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700
02:00	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	750
03:00	455	395	20	0	0	0	0	0	0	0	850
04:00	455	455	40	20	0	0	0	0	0	0	950
05:00	455	455	90	20	0	0	0	0	0	0	1 000
06:00	455	455	130	60	25	0	0	0	0	0	1 100
07:00	455	455	130	110	25	0	0	0	0	0	1 150
08:00	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1 200
09:00	455	455	130	130	130	20	25	0	0	0	1 300
10:00	455	455	130	130	162	68	25	10	0	0	1 400
11:00	455	455	130	130	162	80	38	10	10	0	1 450
12:00	455	455	130	130	162	80	85	10	10	10	1 500
13:00	455	455	130	130	162	68	25	10	0	0	1 400
14:00	455	455	130	130	130	20	25	0	0	0	1 300
15:00	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1 200
16:00	455	455	130	20	0	0	0	0	0	0	1 050
17:00	455	455	90	20	0	0	0	0	0	0	1 000
18:00	455	455	130	60	25	0	0	0	0	0	1 100
19:00	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1 200
20:00	455	455	130	130	162	68	25	10	0	0	1 400
21:00	455	455	130	130	130	20	25	0	0	0	1 300
22:00	455	455	130	60	25	0	0	0	0	0	1 100
23:00	455	445	20	0	0	0	0	0	0	0	900
24:00	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	800

表 I3　10 机组近似解

Table I3　10 units approximate solution

MW

时刻	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10	负荷
01:00	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700
02:00	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	750
03:00	455	375	20	0	0	0	0	0	0	0	850
04:00	455	455	20	20	0	0	0	0	0	0	950
05:00	455	455	70	20	0	0	0	0	0	0	1 000
06:00	455	455	130	35	25	0	0	0	0	0	1 100
07:00	455	455	130	85	25	0	0	0	0	0	1 150
08:00	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1 200
09:00	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1 300
10:00	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1 400
11:00	455	455	130	130	162	73	25	10	10	0	1 450
12:00	455	455	130	130	162	80	58	10	10	10	1 500
13:00	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1 400
14:00	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1 300
15:00	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1 200
16:00	455	455	95	20	25	0	0	0	0	0	1 050
17:00	455	455	45	20	25	0	0	0	0	0	1 000
18:00	455	455	130	35	25	0	0	0	0	0	1 100
19:00	455	455	130	130	30	0	0	0	0	0	1 200
20:00	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1 400
21:00	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1 300
22:00	455	455	100	20	25	20	25	0	0	0	1 100
23:00	455	425	20	0	0	0	0	0	0	0	900
24:00	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	800

表 I4　策略 1 的机组出力

Table I4　Unit generation output of strategy 1

MW

时刻	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10	负荷
01:00	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700
02:00	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	750
03:00	455	375	52	0	0	0	0	0	0	0	850
04:00	455	455	78	26	0	0	0	0	0	0	950
05:00	455	455	104	52	0	0	0	0	0	0	1 000
06:00	455	455	130	78	32.4	0	0	0	0	0	1 100
07:00	455	455	130	104	64.8	0	0	0	0	0	1 150
08:00	455	455	130	130	97.2	0	0	0	0	0	1 200
09:00	455	455	130	130	129.6	41	25	0	0	0	1 300
10:00	455	455	130	130	162	57	25	10	0	0	1 400
11:00	455	455	130	130	162	73	41	10	10	0	1 450
12:00	455	455	130	130	162	80	58	10	10	10	1 500
13:00	455	455	130	130	162	64	41	10	0	0	1 400
14:00	455	455	130	130	129.6	48	25	0	0	0	1 300
15:00	455	455	130	130	97.2	0	0	0	0	0	1 200
16:00	455	455	104	104	64.8	0	0	0	0	0	1 050
17:00	455	455	104	78	64.8	0	0	0	0	0	1 000
18:00	455	455	130	104	97.2	0	0	0	0	0	1 100
19:00	455	455	130	130	129.6	0	0	0	0	0	1 200
20:00	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1 400
21:00	455	455	130	130	129.6	20	25	0	0	0	1 300
22:00	455	455	104	104	97.2	20	25	0	0	0	1 100
23:00	455	425	78	0	0	0	0	0	0	0	900
24:00	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	800

表 I5　方法 1 最终解

Table I5　Final solution of method 1

MW

时刻	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10	负荷
01:00	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700
02:00	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	750
03:00	455	343	52	0	0	0	0	0	0	0	850
04:00	455	391	78	26	0	0	0	0	0	0	950
05:00	455	415	78	52	0	0	0	0	0	0	1 000
06:00	455	455	79.6	78	32.4	0	0	0	0	0	1 100
07:00	455	455	97.2	78	64.8	0	0	0	0	0	1 150
08:00	455	455	114.8	78	97.2	0	0	0	0	0	1 200
09:00	455	455	114.4	104	105.6	41	25	0	0	0	1 300
10:00	455	455	130	130	138	57	25	10	0	0	1 400
11:00	455	455	130	130	155	64	41	10	10	0	1 450
12:00	455	455	130	130	162	80	58	10	10	10	1 500
13:00	455	455	130	115.4	129.6	64	41	10	0	0	1 400
14:00	455	455	130	89.8	97.2	48	25	0	0	0	1 300
15:00	455	455	130	95.2	64.8	0	0	0	0	0	1 200
16:00	455	389.4	104	69.2	32.4	0	0	0	0	0	1 050
17:00	455	324.2	78	78	64.8	0	0	0	0	0	1 000
18:00	455	391.8	78	78	97.2	0	0	0	0	0	1 100
19:00	455	407.4	104	104	129.6	0	0	0	0	0	1 200
20:00	455	455	130	130	162	33	25	10	0	0	1 400
21:00	455	455	111.4	104	129.6	20	25	0	0	0	1 300
22:00	430.4	364	85.4	78	97.2	20	25	0	0	0	1 100
23:00	455	385.6	59.4	0	0	0	0	0	0	0	900
24:00	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	800

表 I6　策略 2 的机组出力

Table I6　Unit generation output of strategy 2

MW

时刻	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10	负荷
01:00	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700
02:00	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	750
03:00	455	375	20	0	0	0	0	0	0	0	850
04:00	455	455	20	20	0	0	0	0	0	0	950
05:00	455	455	46	20	0	0	0	0	0	0	1 000
06:00	455	455	72	35	25	0	0	0	0	0	1 100
07:00	455	455	98	61	25	0	0	0	0	0	1 150
08:00	455	455	124	87	30	0	0	0	0	0	1 200
09:00	455	455	130	113	62.4	20	25	0	0	0	1 300
10:00	455	455	130	130	94.8	33	25	10	0	0	1 400
11:00	455	455	130	130	127.2	49	25	10	10	0	1 450
12:00	455	455	130	130	159.6	65	42	10	10	10	1 500
13:00	455	455	130	130	162	49	25	10	0	0	1 400
14:00	455	455	130	130	129.6	33	25	0	0	0	1 300
15:00	455	455	130	130	97.2	0	0	0	0	0	1 200
16:00	455	455	104	104	64.8	0	0	0	0	0	1 050
17:00	455	455	78	78	32.4	0	0	0	0	0	1 000
18:00	455	455	104	52	25	0	0	0	0	0	1 100
19:00	455	455	130	78	30	0	0	0	0	0	1 200
20:00	455	455	130	104	62.4	33	25	10	0	0	1 400
21:00	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1 300
22:00	455	455	104	104	52.6	20	25	0	0	0	1 100
23:00	455	425	78	0	0	0	0	0	0	0	900
24:00	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	800

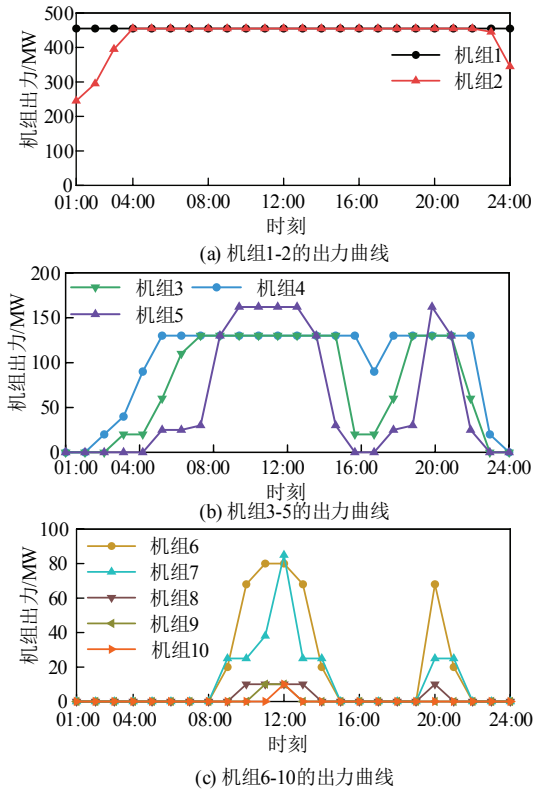
表 I7　方法 2 最终解

Table I7　Final solution of method 2

MW

时刻	1	2	4	3	5	6	7	8	9	10	负荷
01:00	455	245	0	0	0	0	0	0	0	0	700
02:00	455	295	0	0	0	0	0	0	0	0	750
03:00	455	375	20	0	0	0	0	0	0	0	850
04:00	455	455	20	20	0	0	0	0	0	0	950
05:00	455	455	46	44	0	0	0	0	0	0	1 000
06:00	455	455	72	70	48	0	0	0	0	0	1 100
07:00	455	455	98	96	46	0	0	0	0	0	1 150
08:00	455	455	124	122	44	0	0	0	0	0	1 200
09:00	455	455	130	130	76.4	28.6	25	0	0	0	1 300
10:00	455	455	130	130	108.8	44.6	42	21	13.6	0	1 400
11:00	455	455	130	130	141.2	60.6	58.2	10	10	0	1 450
12:00	455	455	130	130	162	65	42	21	21	19	1 500
13:00	455	455	130	130	146	49	25	10	0	0	1 400
14:00	455	455	114.4	104	113.6	33	25	0	0	0	1 300
15:00	455	455	130	78.8	81.2	0	0	0	0	0	1 200
16:00	455	389.4	104	52.8	48.8	0	0	0	0	0	1 050
17:00	455	415.2	78	26.8	25	0	0	0	0	0	1 000
18:00	455	455	104	52.8	33.2	0	0	0	0	0	1 100
19:00	455	455	130	78.8	65.6	49	0	0	0	0	1 200
20:00	455	455	130	104.8	98	36	42	55	24.2	0	1 400
21:00	455	455	130	130	85	20	25	0	0	0	1 300
22:00	430.4	364	104	104	52.6	20	25	0	0	0	1 100
23:00	455	367	78	0	0	0	0	0	0	0	900
24:00	455	345	0	0	0	0	0	0	0	0	800

附录 J



(a) 机组1-2的出力曲线

(b) 机组3-5的出力曲线

(c) 机组6-10的出力曲线

图 J1　机组出力曲线(初始解)

Fig.J1　Unit generation output (initial solution)

10 机组的初始解中各机组出力情况如图 J1 所示。从机组启停状态上看，机组 5 的最小停机时间为 6 小时，但是在 17:00 的停机时间仅 2 小时。机组 6 和机组 7 的最小开机时间均为 3 小时，但是机组 6 和机组 7 在 22:00 的开机时间不足 3 小时，违反了最小启停时间约束。从机组出力变化上看，机组 2 在 03:00 和 24:00 违反了爬坡约束；机组 3 在 06:00~07:00 和 16:00、18:00~19:00 和 22:00 违反了爬坡约束；机组 4 在 05:00~06:00、17:00~18:00 和 23:00 违反了爬坡约束;机组 5 在 09:00、15:00、20:00 和 22:00 违反了爬坡约束；机组 6 在 10:00、14:00 和 21:00 违反了爬坡约束;机组 7 在 12:00~13:00 违反了爬坡约束。

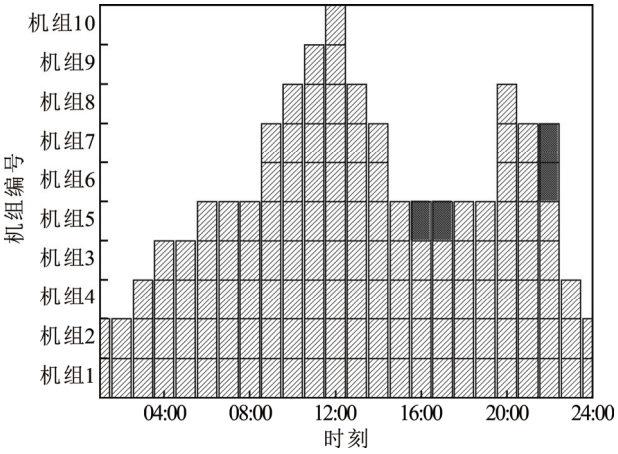


图 J2　机组启停状态

Fig.J2　Unit up/down status

10 机组的近似解中各机组的启停状态和出力变化情况如图 J2 和图 J3 所示。由 J2 可知，机组 5 最小停机时间为 6 h，在 17:00 的停机时间不足 5 小时，因此在第 16:00 和 17:00 开机。同理，机组 6 和机组 7 在 22:00 开机。由 J3 可知，虽然近似解满足了最小启停时间约束，但是违反爬坡约束的情况依然存在。机组 3 在 07:00~08:00、16:00、19:00 和 22:00 违反了爬坡约束；机组 4 在 05:00~06:00、16:00~18:00 和 22:00~23:00 违反了爬坡约束；机组 5 在 09:00~10:00、14:00~15:00 和 20:00~22:00 违反了爬坡约束；机组 6 在 11:00、13:00 违反了爬坡约束；机组 7 在 12:00~13:00 违反了爬坡约束。

经爬坡约束机组调整策略 1 和方法 1 调整后的机组出力曲线如图 J4 和 J5 所示。由 J4 可知，策略 1 调整后，机组 3 增加了 04:00~07:00、16:00~18:00 和 22:00 出力；机组 4 增加了 03:00~05:00、

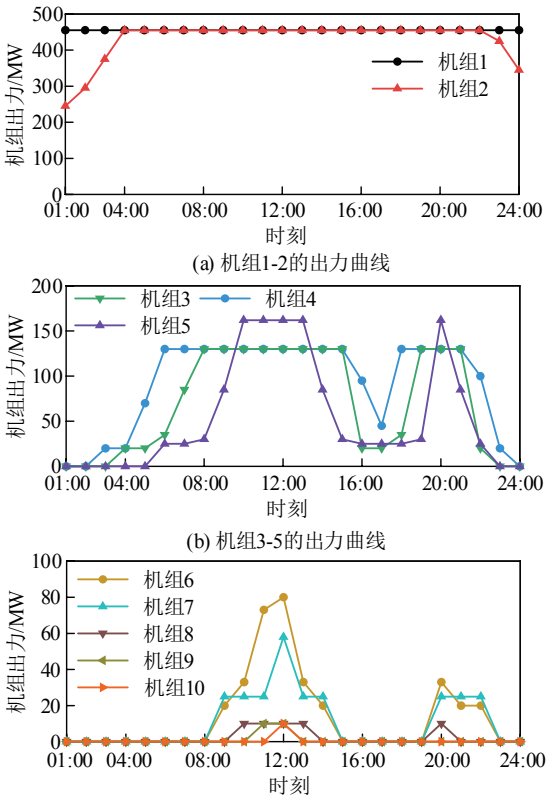


图 J3　机组出力曲线(近似解)

Fig.J3　Unit generation output (approximate solution)

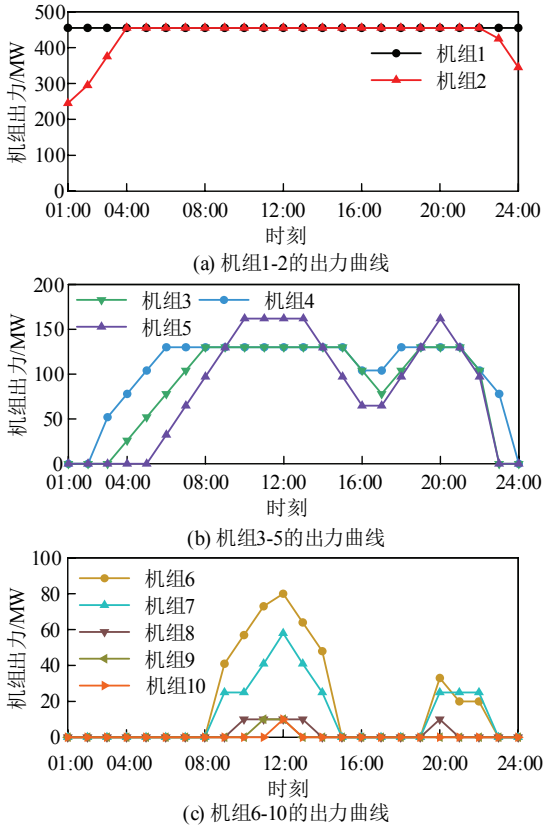
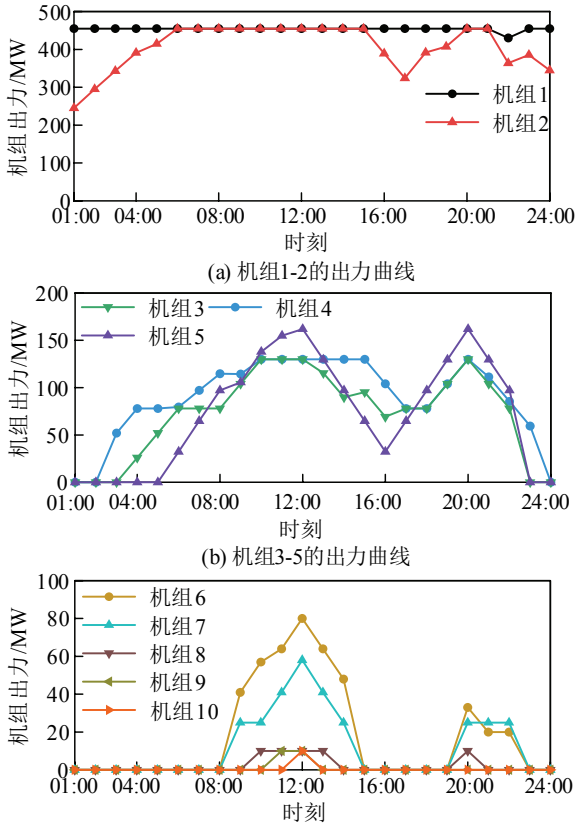


图 J4　机组出力曲线(策略 1)

Fig.J4　Unit generation output (strategy 1)



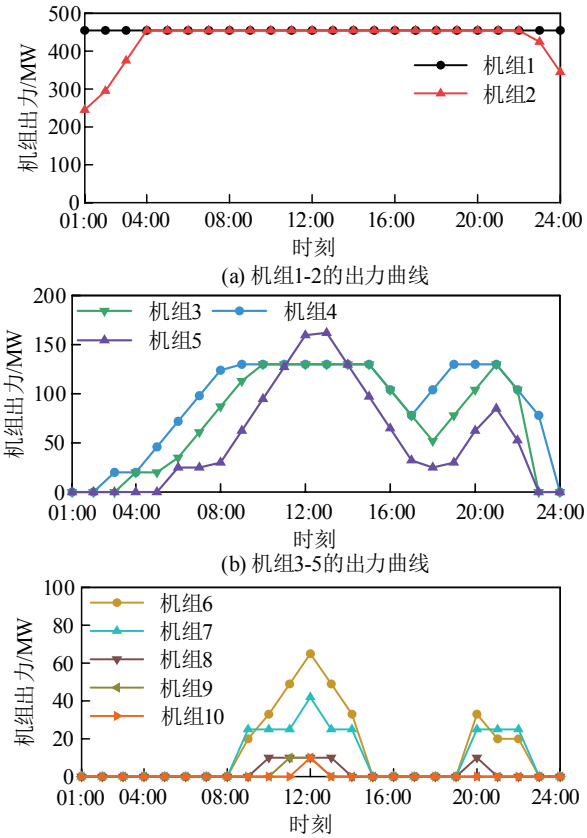
(a) 机组1-2的出力曲线

(b) 机组3-5的出力曲线

(c) 机组6-10的出力曲线

图 J5　机组出力曲线(最终解 1)

Fig.J5　Unit generation output (final solution 1)



(a) 机组1-2的出力曲线

(b) 机组3-5的出力曲线

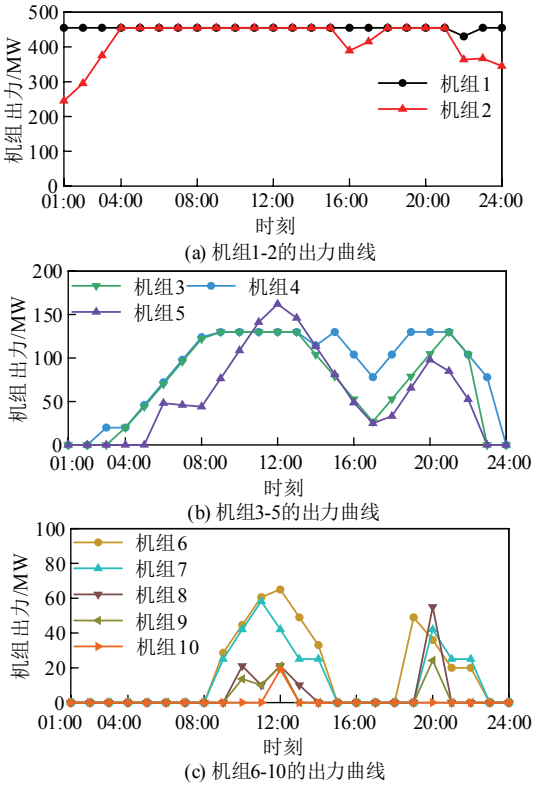
(c) 机组6-10的出力曲线

图 J6　机组出力曲线(策略 2)

Fig.J6　Unit generation output (strategy 2)

16:00~17:00 和 22:00~23:00 的出力；机组 5 增加了 06:00~09:00、14:00~19:00 和 21:00~22:00 出力；机组 6 增加了 09:00~10:00、13:00~14:00 出力；机组 7 增加了 11:00 和 13:00 出力，满足了整个时段的爬坡约束。这说明，通过爬坡约束机组调整策略 1 解决了机组出力波动较大，违反爬坡约束的问题。由图 J5 可知，经精确冗余机组调整策略和机组启动方式调整策略调整后，机组 1 减少了 22:00 的冗余出力；机组 2 减少了 03:00~05:00、16:00~19:00 和 22:00~23:00 的冗余出力；机组 3 减少了 07:00~09:00、13:00~16:00、18:00~19:00 和 21:00~22:00 的冗余出力；机组 4 减少了 05:00~09:00、17:00~19:00、21:00~23:00 的冗余出力；机组 5 减少了 09:00~11:00、13:00~16:00 的冗余出力；机组 6 减少了 11:00 的冗余出力。这说明，最终解 1 不仅满足了爬坡约束的要求，而且减少了冗余机组的出力，从而降低了机组运行费用。

经过经爬坡约束机组调整策略 2 和方法 2 调整后的机组出力曲线如图 J6 和 J7 所示。由图 J6 可知，策略 2 调整后，机组 3 减少了 07:00~09:00 和 19:00~



(a) 机组1-2的出力曲线

(b) 机组3-5的出力曲线

(c) 机组6-10的出力曲线

图 J7　机组出力曲线(最终解 2)

Fig.J7　Unit generation output (final solution 2)

20:00 机组的出力，增加了 16:00~18:00 和 22:00 的出力；机组 4 减少了 05:00~08:00 和 18:00 的出力，增加了 16:00~17:00 和 22:00~23:00 的出力；机组 5 减少了 09:00~12:00 和 20:00 的出力，增加了 14:00~17:00 和 22:00 的出力；机组 6 减少了 11:00~12:00 的出力，增加了 13:00~14:00 的出力；机组 7 减少了 12:00 的出力。相比于策略 1，策略 2 不仅解决了机组出力波动较大，违反爬坡约束的问题，而且使机组出力变化更加平缓，但是由于某些时刻机组出力的减少，难免会有切负荷的产生。由 J7 可知，经过精确冗余/缺额机组调整策略和机组启动方式调整策略调整后，机组 1 减少了 22:00 的冗余出力；机组 2 减少了 16:00~17:00 和 22:00~23:00 的冗余出力；机组 3 增加了 05:00~09:00 和 18:00~20:00 的缺额出力，减少了 14:00~17:00 的冗余出力；机组 4 减少了 14:00 的冗余出力，机组 5 减少了 13:00~17:00 的冗余出力，增加了 06:00~12:00 和 18:00~20:00 的缺额出力；机组 6 增加了 09:00~11:00 和 19:00~20:00 的缺额出力；机组 7 增加了 10:00~11:00 和 20:00 的缺额出力；机组 8 增加了 10:00、12:00 和 20:00 的缺额出力；机组 9 增加了 10:00、12:00 和 20:00 的缺额出力，其中在 20:00 进行了开机操作；机组 10 增加了 12:00 的缺额出力。总体来看，最终解 2 满足了爬坡约束的要求，减少了冗余机组出力，增加了缺额机组出力，从而降低了机组运行费用。