

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.013

# 基于高比例可再生能源的废矿抽蓄电站优化配置研究

滕松<sup>1</sup>, 刘毅<sup>2</sup>, 钟睿<sup>2,3</sup>, 张敬<sup>4</sup>, 梁睿<sup>2,3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司, 江苏 徐州 221005; 2. 江苏煤矿电气与自动化工程实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 徐州 221006)

**摘要:**发展以风光能源为代表的绿色清洁能源已经成为大势所趋,与此同时,随着国家深入推进煤炭去产能进程,大量煤矿被废弃,废矿治理研究颇受重视。为此,首先设计了废矿抽蓄电站的基本结构,对废矿抽蓄电站的运行功率和不同运行工况进行数学建模。在此基础上,以降低废矿抽蓄电站投资成本、矿区配电网系统运维成本及弃风弃光和负荷缺电的惩罚成本为目标,构建了废矿抽蓄电站的优化配置模型。通过混合粒子群和模拟退火算法,对优化配置模型进行求解。基于改进的IEEE 14节点配电网系统建立测试案例,对比不同场景下废矿抽蓄装机容量和接入节点对目标函数的影响,对优化配置模型和算法的有效性进行了分析和验证,确定废矿抽蓄电站的装机容量和选址等相关参数。

**关键词:**废矿抽蓄电站; 矿区配电网; 优化配置; 风光能源; 电能替代

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)04-0087-09

## 0 引言

清洁、高效的电能替代引领着当下的能源变革,风光新能源凭借发电成本低、污染小、利用率高的优势受到了学术界的广泛重视<sup>[1-2]</sup>。但是,风光分布式电源同样存在一些问题:如分布式发电单机接入成本明显高于传统电源,可再生能源出力具有间歇性和不可控性,分布式电源并网必然会对系统电压、频率等电气参数产生负面影响。此外,当大电网故障波及分布式系统自身出现大容量波动,导致分布式系统解列或切机,会造成能源的浪费,降低资源利用率<sup>[3]</sup>。

我国集中于西北、华北的矿区负荷呈现区域集中但布点分散的特点,供电点远离负荷。由于自备电源不足<sup>[4]</sup>,矿区配电网对上级电网的依赖性较强。矿区风光资源丰富为大力开发清洁能源提供了条件,但新能源发电固有的间歇、波动特性也进一步加重矿区配网供电可靠性低的问题。反常态情况下,风光出力集中,配网难以就地消纳;风光出力匮乏,配网仍无法与上级电网呈弱连接状态,负荷缺电率较高。

通过分布式电源管理、负荷管理和储能系统管理,可以实现系统稳定运行和潮流管理<sup>[5-6]</sup>。矿区

中可调负荷较少,风光发电无法有效控制,储能系统作为配网中首要可控调度单元,必须在满足供电可靠性的基础上尽可能地减少弃风弃光。蓄电池、超级电容等快速储能设备因其功率密度高的特点而被广泛应用于改善电能质量,但其容量小、成本高的缺陷使其无法保证配网中的供电可靠性。抽水蓄能作为当今早已娴熟的技术手段,在调峰任务中有着出色的表现。文献[7]构建了以风蓄联合系统经济效益和送出功率平稳为优化目标的大型风电和抽水蓄能电站协调的多目标优化模型,确立了风机的最佳装机容量;文献[8]通过分析抽蓄电站的配置方式,证明了通过抽蓄电站的优化配置和优化运行可以提高系统的经济效益;文献[9]优化了求解抽蓄电站的容量和调度方案,使系统在潮流分布与经济性方面得到显著提升。现有研究多集中于利用抽蓄电站调峰、消纳新能源问题,而在类似集群微网的矿区电网环境下,小型抽蓄机组不仅可以作为辅助机组,而且在微型燃气轮机的配合下能够充分利用丰富的风光资源,实现矿区配网供电的自给自足。

基于我国西北部矿区存在大量废弃矿井的现有地理资源条件,文中设计了废弃矿井抽水电站的基本结构,建立其基本数学模型,并在此基础上建立含废矿抽蓄电站的矿区配电网优化配置模型,利用混合粒子群算法对优化模型进行求解从而对其定容、布点,在满足可靠性与经济性的基础上实现高比例可再生能源消纳。

收稿日期:2020-02-09;修回日期:2020-03-13

基金项目:国家重点研发计划资助项目“矿山安全产物联网关键技术与装备研发”(2017YFC0804400);江苏省“六大人才高峰”项目(XNY-046)

## 1 废矿抽蓄电站的结构和建模

废矿抽蓄电站是对传统地表抽蓄电站的一种改造,是在废弃矿井治理的背景下试图打破传统抽蓄电站众多制约因素所提出的一种可行并且具有新意的储能方式。根据之前的国际研究,废矿抽蓄电站根据容量大小分为小型电站(10 kW~10 MW)和大型电站(10~3 000 MW),当具有满足要求的废弃矿井空间和相应的井下地质结构时,建设小型废矿抽蓄电站相对容易,下面将对文中所设计抽蓄电站的基本结构和建模进行介绍。

### 1.1 废矿抽蓄电站的优势

常规地表抽蓄电站选址需要上下水库之间有足够大的落差,这限制了地表抽蓄电站的发展。废矿抽蓄电站自身结构建于废弃矿井下,不再依赖地表高落差的地形条件,具有合适地质结构的废弃矿井都满足其选址的基本条件。另一方面,地表抽蓄电站占地面积大、水流损耗大、投资高且对生态环境影响较大。废矿抽蓄电站缓解了地表抽蓄电站所面临的诸多挑战,其不再依赖于地表结构。此外,大量废弃矿井造成了资源浪费,带来了生态污染和安全隐患,废矿治理一直是众多研究人员的课题。废矿抽蓄电站一举两得,不仅实现了废矿治理,还建造了抽蓄电站服务于电力系统取得经济效益。

废矿抽蓄电站拥有一个垂直的水流路径,只有一个地表上水库,从而大大减少了横向水流所导致的损耗。此外废矿抽蓄电站不消耗净水(除了蒸发),因此只要有合适的地下地质结构,其运行就不再依赖于水流损耗。废矿抽蓄电站地下装置对环境的影响要比传统的抽蓄电站小,废矿抽蓄电站免除了修建新的河流大坝和地表的大型发电所,充分利用了废弃矿井巨大的地下空间,实现了废矿重新利用,节约了占地面积,降低了噪声,减少了电站工程对周围生态环境的破坏。

小型废矿抽蓄电站的经济性规模是一个比较复杂的问题,影响因素包括电力市场、矿井地质结构、地下水层特点、现有废弃矿井结构、井下现有基础设施、区域负荷情况及可再生能源规模和出力特性,这些因素影响了其最优规模的选择。通过合理规划废矿抽蓄电站的容量和接入区域,协调电站高效运行可以实现综合经济效益最大化。废矿抽蓄电站下水库和电站地下装置等直接利用废矿地下空间,节约了重新挖掘土方的成本等。相比于蓄电池储能,虽然其响应速度没有蓄电池快,但是其技术成熟,服务寿命长,装机容量较大。而蓄电池储

能电站投资大,成本高,服务寿命短,无法大量应用,况且电池废弃以后相应的回收处理成本和造成的环境污染都很大。

综上,废矿抽蓄电站对于配电网不仅可以改善负荷特性,提高风光消纳,提高系统的稳定性,还可以增强系统灵活性和供电可靠性。废矿抽蓄电站不再依赖于常规抽蓄电站的地形条件,运行也不再依赖于水流损耗,既实现了废矿重新利用,节约了占地面积,减少了对环境的破坏,又利用了废矿地下空间,节约了抽蓄电站的建造成本,相对于传统抽蓄电站和蓄电池储能具有一定的优势。

### 1.2 废矿抽蓄电站的结构

文中所设计的废矿抽蓄电站结构立足于小型废矿抽蓄电站,利用矿井现有地下水结构,但考虑到废弃矿井地下含水层结构的差异较大,为了保证电站的正常工作不受废弃矿井下含水层的影响,电站设计时不采用地下含水层作为下水库,而是和大型废矿抽蓄电站一样,修建坚固的下水库,保障下水库水量的稳定。废矿抽蓄电站系统的要素包括:(1)地表上水库和废弃矿井下水库;(2)大流量输水系统;(3)集成电机-泵涡轮发电机单元;(4)电能输送系统(电力电子、控制、保护等);(5)辅助装置(通风系统等)。

具体实际应用可以参考神东矿区的废矿水库以及利用采煤塌陷区改造成的徐州潘安湖湿地公园。下水库是废矿抽蓄电站的核心,位于废弃矿井下的巷道群和采空区,研究和实践表明建造安全坚固的下水库是废矿抽蓄电站能否实施的关键。下水库不仅对电站和水量的安全有影响,还对电站的建造成本影响巨大,主要取决于地质和规模等因素。废矿抽蓄电站需要在废弃矿井下合适的深度和区域建造下水库,其中优选硬质岩石作为下水库的地床,如果井下地质条件受限,同样可以采用混凝土浇筑的方式,结构性能也能达到很好。

抽蓄电站一般有单降或双降2种结构,水轮机和水泵需要在非常高的压力下运行,其有效性和容量决定下水库的建造深度以及是否使用双降系统。然而,出力相同情况下,随着深度的增加,水量会减少,因此设计蓄水池深度时要考虑该平衡关系,综合考虑后废矿抽蓄电站采用单降结构,如图1所示。

### 1.3 废矿抽蓄电站的建模

关于风光的建模和控制方法相关文献已经介绍很多<sup>[10]</sup>,其中风电机组的输出功率与风速关系是基于空气动力学原理,光伏电池的输出功率与光强和温度关系是基于光电效应。

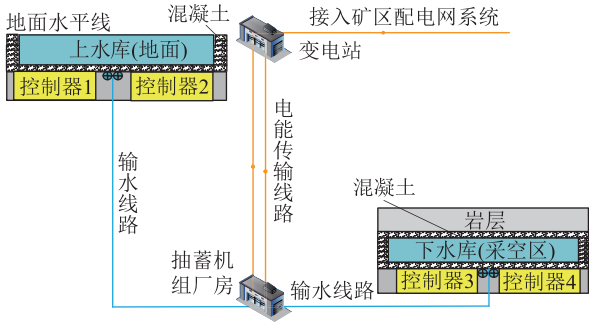


图1 废矿抽蓄电站结构

Fig.1 Structure abandoned mine pumped storage station

研究发现,废矿抽蓄电站的净水头可以通过前池水位减去尾水位和水头损失求得<sup>[11]</sup>:

$$h = h_{\text{front}} - h_{\text{tail}} - h_{\text{loss}} \quad (1)$$

$$h_{\text{front}} = f_1(V) \quad (2)$$

$$h_{\text{tail}} = f_2(q) \quad (3)$$

式中: $h$  为净水头, m;  $h_{\text{front}}$  为前池水位;  $h_{\text{tail}}$  为尾水位;  $h_{\text{loss}}$  为水头损失;  $V$  为库容;  $q$  为机组发电用水量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $f_1$  为前池水位和库容的关系;  $f_2$  为尾水位和发电用水流量的关系。流量和蓄水池容量影响能量并受制于发电时间, 密切相关, 流量和蓄水池容量这 2 个量将取决于所选位置的特点以及最终的使用要求。

通过分析水电转换关系, 机组效率是机组发电用水量与净水头的二次函数<sup>[11]</sup>, 相应关系如下:

$$\eta = \rho_0 + \rho_1 q + \rho_2 h + \rho_3 h q + \rho_4 q^2 + \rho_5 h^2 \quad (4)$$

其中, 各项系数  $\rho_i$  ( $i=0, 1, 2, 3, 4, 5$ ) 可以通过数据拟合得到。

通过分析上述公式, 机组出力  $p$ 、水流量  $q$  和净水头  $h$  之间满足非线性函数关系, 具体如下:

$$p = f(h, q) \quad (5)$$

研究表明, 当水头和流量均达到最大时, 输出功率也达到最大, 一般来说水头取决于抽蓄电站的位置特点, 而流量也有可能增加。除了输出功率, 系统传送的能量输出也能达到最大, 存储的能量取决于蓄水容量和系统的额定功率(压力、流量和效率)。对于文中所设计的废矿抽蓄电站系统, 要使电站的输出功率达到最大, 为此, 涡轮机的效率、有效水头以及水流量都要达到最大。因此, 废矿抽蓄电站基本功率计算公式可以简化为<sup>[12-13]</sup>:

$$p = q h \rho g \eta \quad (6)$$

式中: $p$  为输出功率, W;  $\rho$  为水的密度(默认为  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ );  $g$  为重力加速度(通常取  $10 \text{ m}/\text{s}^2$ );  $\eta$  为效率(文中取 60%)。

当废矿抽蓄电站运行在抽水状态时, 根据水泵

的特性, 可以得到水泵转轴上的传递功率为:

$$P_{\text{ps}} = \frac{\pi}{30} N_{\text{tm}} T_{\text{m}} W_{\text{d}}^2 H_{\text{d}}^{1.5} \quad (7)$$

式中:  $N_{\text{tm}}$  为单位转速;  $T_{\text{m}}$  为单位力矩;  $W_{\text{d}}$  为转轮直径;  $H_{\text{d}}$  为上下游水位差。

当废矿抽蓄电站运行在发电状态时, 根据发电机的特性, 可以得到发电机转轴上的传递功率为:

$$P_{\text{hb}} = 9.81 S_{\text{w}} W_{\text{d}}^2 H_{\text{d}}^{1.5} \quad (8)$$

式中:  $S_{\text{w}}$  为水流流速。

## 2 矿区配电网中废矿抽蓄电站的优化配置

研究利用废矿构建抽蓄电站服务于矿区配电网运行是一种新的尝试, 对矿区配网的安全稳定运行、新能源的消纳具有重要意义。以降低投资成本、运维成本以及弃风光和缺电为目标, 建立了矿区配电网系统中废矿抽蓄电站的优化配置模型。

### 2.1 优化模型建立

文中假设所研究的矿区配电网系统除储能电站外的部分已经存在, 且不计投资成本。对于储能电站采用文中设计的废矿抽蓄电站, 其优化配置主要包括两方面: 电站装机容量和接入节点位置的选择。由于上级电网不能视为理想电源, 其调节能力时常受到电力系统运行工况的限制, 所以在优化过程中既要考虑上级电网的调节成本, 也要考虑在上级电网调节能力受限时弃风、弃光的浪费成本和负荷缺电的风险成本。优化模型的调度时间设为  $\tau$ ,  $T$  为日调度时段集合。

目标函数 1: 废矿抽蓄电站日均投资成本。

$$f_1 = c_{\text{pu\_ge}} P_{\text{pu\_ge}} \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{pu\_ge}}$  为废矿抽蓄电站的装机容量, kW;  $c_{\text{pu\_ge}}$  为废矿抽蓄电站的单位容量日均投资成本, 元/kW。

目标函数 2: 系统日运行维护总成本。

$$f_2 = C_{\text{renew}} + C_{\text{gast}} + C_{\text{pu\_ge}} + C_{\text{exter}} + C_{\text{loss}} \quad (10)$$

$$C_{\text{renew}} = \lambda_{\text{wt}} \tau \sum_{t \in T} P_{\text{wt}}(t) + \lambda_{\text{pv}} \tau \sum_{t \in T} P_{\text{pv}}(t) \quad (11)$$

$$C_{\text{gast}} = \lambda_{\text{gast}} \tau \sum_{t \in T} P_{\text{gast}}(t) \quad (12)$$

$$C_{\text{pu\_ge}} = \lambda_{\text{pu}} \tau \sum_{t \in T} P_{\text{pu}}(t) + \lambda_{\text{ge}} \tau \sum_{t \in T} P_{\text{ge}}(t) \quad (13)$$

$$C_{\text{exter}} = \lambda_{\text{exter}} \tau \sum_{t \in T} |P_{\text{exter}}(t)| \quad (14)$$

$$C_{\text{loss}} = \lambda_{\text{loss}} \tau \sum_{t \in T} [P_{\text{loss}}(t) + Q_{\text{loss}}(t)] \quad (15)$$

式中:  $C_{\text{renew}}$ ,  $C_{\text{gast}}$ ,  $C_{\text{pu\_ge}}$  分别风光电源、燃气轮机、废矿抽蓄电站的日运维成本;  $C_{\text{exter}}$ ,  $C_{\text{loss}}$  分别为上级电网对矿区配电网的调节成本和矿区配电网系统的网损成本;  $P_{\text{wt}}(t)$ ,  $P_{\text{pv}}(t)$ ,  $P_{\text{gast}}(t)$  分别为  $t$  时段风、光、燃气轮机有功出力;  $P_{\text{pu}}(t)$ ,  $P_{\text{ge}}(t)$  分别为废矿抽

蓄电站抽水、发电功率;  $P_{\text{exter}}(t), P_{\text{loss}}(t), Q_{\text{loss}}(t)$  分别为上级电网调节功率, 系统网损有功功率和无功功率,  $\text{kV}\cdot\text{A}$ ; 系数  $\lambda_{\text{wt}}, \lambda_{\text{pv}}, \lambda_{\text{gast}}, \lambda_{\text{pu}}, \lambda_{\text{ge}}, \lambda_{\text{loss}}$  为相应指标单位成本, 元/ $(\text{kV}\cdot\text{A}\cdot\text{h})$ 。废矿抽蓄电站启停成本一般在 20 元/ $(\text{MW}\cdot\text{次})$ , 鉴于矿区配电网中废矿抽蓄电站装机容量不大, 且对废矿抽蓄日运行的启停次数进行了约束, 所以不考虑启停成本。

目标函数 3: 弃风弃光和负荷缺电惩罚成本。弃风弃光率  $\gamma$  和负荷缺电率  $\delta$  的计算公式为:

$$\gamma = \frac{\sum_{t \in T} P_{\text{renewloss}}(t)}{\sum_{t \in T} P_{\text{renew}}(t)} \times 100\% \quad (16)$$

$$\delta = \frac{\sum_{t \in T} P_{\text{loadloss}}}{\sum_{t \in T} P_{\text{load}}} \times 100\% \quad (17)$$

$$f_3 = \lambda_{\text{curt}} \sum_{t \in T} P_{\text{renewloss}}(t) + \lambda_{\text{shed}} \sum_{t \in T} P_{\text{loadloss}}(t) \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{renewloss}}(t)$  为  $t$  时段弃风弃光浪费的功率;  $P_{\text{renew}}(t)$  为  $t$  时段风光发电功率之和;  $P_{\text{load}}(t)$  为  $t$  时段系统负荷功率;  $P_{\text{loadloss}}(t)$  为  $t$  时段负荷缺电损失的功率;  $\lambda_{\text{curt}}, \lambda_{\text{shed}}$  分别为弃风弃光和负荷缺电的单位惩罚成本, 元/ $(\text{kV}\cdot\text{A}\cdot\text{h})$ 。

总结目标函数为:

$$F = \min[\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3] \quad (19)$$

式中:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为各目标权重系数。层次分析法的主观性较强, 而熵权法的客观性较强, 结合这 2 种定权方法, 提出如下定权方法<sup>[14]</sup>。

$$\lambda_z = \frac{\lambda_{\text{AHP}_z} + \lambda_{\text{EM}_z}}{\sum (\lambda_{\text{AHP}_z} + \lambda_{\text{EM}_z})} \quad (20)$$

式中:  $\lambda_{\text{AHP}_z}$  为目标  $z$  的层次分析法权值;  $\lambda_{\text{EM}_z}$  为目标  $z$  的熵权法权值;  $\lambda_z$  为目标  $z$  的最终权值。

## 2.2 约束条件

优化配置模型的约束条件主要包含矿区配电网系统运行约束和废矿抽蓄电站运行约束。

### 2.2.1 矿区配电网约束

(1) 系统功率平衡约束。

$$P_{\text{wt}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{gast}}(t) + P_{\text{ge}}(t) - P_{\text{pu}}(t) - P_{\text{loss}}(t) - P_{\text{load}}(t) + P_{\text{exter}}(t) = 0 \quad (21)$$

式中:  $P_{\text{load}}(t)$  为  $t$  时段有功负荷;  $P_{\text{exter}}(t)$  为上级电网调节有功功率。

(2) 节点功率平衡约束<sup>[6]</sup>。

$$P_k(t) = U_k(t) \sum_{m \in k} U_m(t) (G_{km} \cos \theta_{km}(t) + B_{km} \sin \theta_{km}(t)) \quad (22)$$

式中:  $P_k(t)$  为  $t$  时段注入节点  $k$  的有功功率;  $U_k(t), U_m(t)$  分别为节点  $k$  和  $m$  的电压, 其中节点  $k, m$  相连;  $G_{km}, B_{km}$  分别为节点导纳矩阵的实部和虚部;  $\theta_{km}(t)$  为节点  $k$  和  $m$  的相角差。

(3) 与上级电网功率交互约束<sup>[15]</sup>。

$$P_{\text{extermin}} \leq P_{\text{exter}}(t) \leq P_{\text{extermax}} \quad (23)$$

式中:  $P_{\text{extermin}}$  为上级电网的最大吸收功率;  $P_{\text{extermax}}$  为上级电网的最大发出功率。

(4) 节点电压约束。

$$\left| \frac{U_k(t) - U_N}{U_N} \right| \leq \xi_v \quad (24)$$

式中:  $U_k(t)$  为  $t$  时段节点  $k$  的电压;  $U_N$  为节点  $k$  额定电压;  $\xi_v$  为电压允许波动率。

(5) 燃气轮机出力约束。

$$P_{\text{gastmin}} \leq P_{\text{gast}} \leq P_{\text{gastmax}} \quad (25)$$

式中:  $P_{\text{gastmin}}$  为燃气轮机最小出力;  $P_{\text{gastmax}}$  为燃气轮机最大出力 (通常为额定容量)。

(6) 抽蓄机组出力。

$$P_{\text{pmin}} \leq P_p \leq P_{\text{pmax}} \quad (26)$$

式中:  $P_{\text{pmin}}$  为抽蓄机组最小出力;  $P_{\text{pmax}}$  为抽蓄机组最大出力 (此条件将根据上下水库库容决定)。

此外还有线路传输功率约束和风光电源出力约束等。对于矿区配电网系统的无功功率负荷采用就地补偿方式, 线路中的无功损耗默认由平衡节点进行平衡, 矿区配网系统规模不大, 其无功功率负荷和无功功率损耗也不大。

### 2.2.2 废矿抽蓄电站运行约束

(1) 抽水发电水量变化约束 (以上水库为例)<sup>[7,11]</sup>。

$$V_{\text{up}}(t) = V_{\text{up}}(t - \tau) - \tau q_{\text{ge}} P_{\text{ge}} \quad (26)$$

$$V_{\text{up}}(t) = V_{\text{up}}(t - \tau) + \tau q_{\text{pu}} P_{\text{pu}} \quad (27)$$

式中:  $V_{\text{up}}(t - \tau), V_{\text{up}}(t)$  分别为上水库  $t - \tau$  时段和  $t$  时段的水量,  $\text{m}^3$ ;  $P_{\text{ge}}, P_{\text{pu}}$  分别为发电、抽水功率,  $\text{kW}$ ;  $q_{\text{ge}}, q_{\text{pu}}$  分别为抽蓄机组发电、抽水平均水量/电量转换系数。

(2) 抽水发电次数约束。

$$0 \leq \sum_{t \in T} |\xi_{\text{pu}}(t) - \xi_{\text{pu}}(t + \tau)| + \sum_{t \in T} |\xi_{\text{ge}}(t) - \xi_{\text{ge}}(t + \tau)| \leq N_{\text{max}} \quad (28)$$

式中:  $\xi_{\text{ge}}(t), \xi_{\text{pu}}(t)$  分别为  $t$  时段发电、抽水状态, 0 表示关闭, 1 表示开启;  $N_{\text{max}}$  为最大启停次数。

(3) 上水库水量约束。

$$V_{\text{upmin}} \leq V_{\text{up}}(t) \leq V_{\text{upmax}} \quad (29)$$

式中:  $V_{\text{upmax}}, V_{\text{upmin}}$  分别为最大库容和最小库容。

(4) 抽水、发电不同时工作约束。

$$\xi_{pu}(t)\xi_{ge}(t) = 0 \quad (30)$$

(5) 电站日调度始末库容变化约束。

$$\frac{|V_{up}(0^+) - V_{up}(24^-)|}{V_{total}} \leq \xi \quad (31)$$

式中:  $V_{total}$  为水库总水量;  $V(0^+)$ ,  $V(24^-)$  分别为上水库日运行开始和结束时刻的水量;  $\xi$  为抽蓄电站日运行允许水量不平衡率。在之前的研究中,一般强制要求  $\xi=0$ ,这是出于电站可持续运行的要求,确保抽蓄电站的水量在长期运行中都符合工况要求。考虑到实际运行的差异性,以及长期运行库容变化的补偿抵消效应,所以文中允许  $\xi$  不为 0,而是一个较小的数。

(6) 下水库约束同理。

$$V_{up}(t) + V_{down}(t) = V_{total} \quad (32)$$

### 3 仿真及算例分析

粒子群算法具有收敛速度快等众多优点,被广泛使用,但是容易陷入局部最优也是算法公认的缺点。为使求解过程更高效地遍历搜寻空间、在迭代后期仍具有较高的全局寻优能力,文中采用粒子群优化和模拟退火的混合优化算法对优化配置模型进行求解,利用 Metropolis 准则允许以一定概率接受非最优解的特性,增加了其跳出局部最优的能力,具体步骤可参考文献[16]。

#### 3.1 仿真案例

基于某含废弃矿井的矿区配电网系统实际结构,通过对 IEEE 14 节点配电网系统进行改进<sup>[17]</sup>,得到图 2 所示配电网系统,其接入信息如表 1 所示,结构参数详见附表 A1,节点 1 为平衡节点连接上级电网。结合该区域的实际数据,得到主动配电网系统典型日负荷数据(详见附表 A2)及风光电源、燃气轮机容量情况。

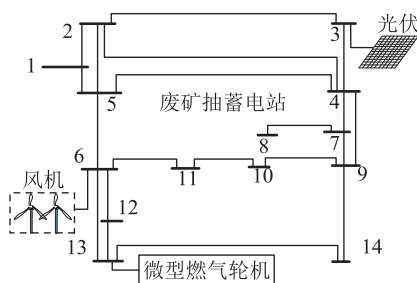


图 2 改进的 IEEE 14 节点配电网系统

Fig.2 Improved IEEE distribution network with 14 nodes

在该区域典型日工况数据的基础上,根据风光出力数据的随机分布情况,拟合出满足一定概率分布的风光出力上下界限,上下界限出力数据对应不

表 1 改进的 IEEE 14 节点配电网系统信息

Table 1 Information of improved IEEE distribution network system with 14 nodes

接入节点	电源类型	容量/MW
6	风机	3
3	光伏	1
13	燃气轮机	1
废矿临近节点	废矿抽蓄电站	1,2,3

同的风光利用系数(即风、光发电平均值与装机容量的比值)。图 3 和图 4 中,场景二为该区域典型日场景,场景一和场景三是基于风光日出力数据拟合得到的该区域 80% 概率分布下的上下限场景,分别称为强风强光场景和弱风弱光场景<sup>[18]</sup>。根据所得 3 种场景下的出力数据对优化模型进行求解,验证文中模型和方法的有效性,确定废矿抽蓄电站的装机容量,以及在矿区配电网中所接入的节点。

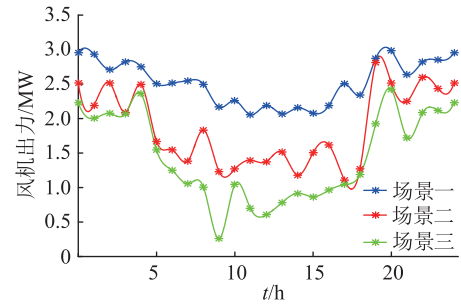


图 3 不同场景下系统风机出力

Fig.3 Wind power output of system in different scenarios

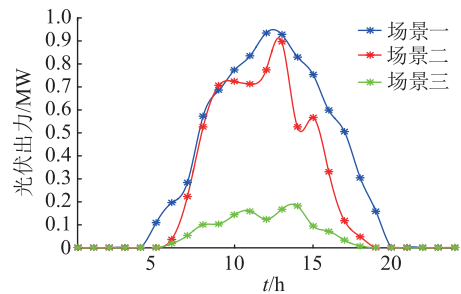


图 4 不同场景下系统光伏出力

Fig.4 PV output of system in different scenarios

优化配置模型中  $\tau=1$  h,因此日优化过程为 24 个时段。优化过程中废矿抽蓄电站的优先级高于燃气轮机,废矿抽蓄电站初始库容采用蒙特卡洛模拟进行给定。

#### 3.2 配置优化求解结果

优化配置模型求解结果如表 2 所示,其中系统日运行维护总成本及弃风弃光和负荷缺电惩罚成本之和数据详见附表 A3。

表 2 中的目标函数是通过改变废矿抽蓄电站接入节点得到的目标函数值平均值。由表 2 可知,除

表2 不同废矿抽蓄机组装机容量下优化结果

Table 2 Optimization results of abandoned mine pumped storage station under different installed capacity 万元

目标函数	场景一	场景二	场景三
1 MW 机组	3.26	3.15	3.24
2 MW 机组	3.24	2.7	2.5
3 MW 机组	3.39	2.75	2.37

了在场景三下 2 MW 废矿抽蓄机组的优化结果没有 3 MW 废矿抽蓄机组的优化结果好,其他情况下均为最优选择。场景三下风光出力大幅降低,远远不能达到负荷的要求,但从矿区配电网系统和废矿抽蓄电站长期运行分析<sup>[19-21]</sup>,这样的弱风弱光场景出现的概率偏低,从系统经济性考虑,该区域废矿抽蓄装机容量选择 2 MW。

表3为含 2 MW 废矿抽蓄电站系统优化结果。通过对比废矿抽蓄电站接入不同节点后得到的目标函数值可以得到,在场景一和场景二下当废矿抽蓄电站接入节点 9 时系统目标函数最优。通过对比场景三下接入节点 6 和接入节点 9 的目标函数值,精确到小数点后四位,可以得到依然是接入节点 9 时系统目标函数最优。综上,将废矿抽蓄电站接入节点 9。

表3 含 2 MW 废矿抽蓄电站系统优化结果

Table 3 Optimization results of system with 2 MW abandoned mine pumped storage station 万元

接入节点	场景一	场景二	场景三
1	3.252	2.653	2.564 0
2	3.260	2.748	2.510 0
3	3.245	2.794	2.522 0
4	3.226	2.658	2.500 0
5	3.258	2.745	2.526 0
6	3.250	2.633	2.459 2
7	3.233	2.725	2.590 0
8	3.247	2.675	2.511 0
9	3.223	2.625	2.458 5
10	3.260	2.640	2.481 0
11	3.243	2.759	2.551 0
12	3.245	2.715	2.527 0
13	3.251	2.797	2.486 0
14	3.243	2.756	2.515 0

### 3.3 分场景仿真分析

由于风光能源作为不可控电源接入配网,其出力的不确定性必然对系统的供电可靠性带来极为不利的影 响。因此,根据不同场景下风光出力数据,检验所建立优化模型及优化配置结果正确性的

同时,能够验证在强风强光、典型场景及弱风弱光场景下抽蓄机组对配网的可靠性供电及消纳新能源所带来的积极效果。

场景一,即强风强光场景下各单元出力对比如图 5 所示。

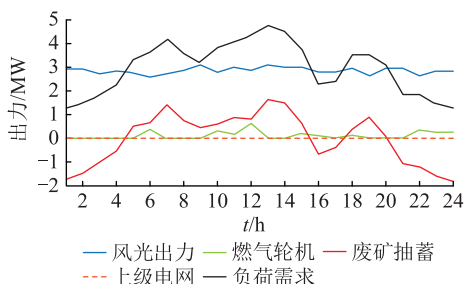


图5 场景一下各单元出力对比

Fig.5 Comparison of each unit output under scene 1

由图 5 可得,强风强光场景下,风光出力较大,基本可以满足该矿区配电网的负荷需求。在废矿抽蓄机组和水库水量相关约束限制下,废矿抽蓄机组在晚间负荷低谷时(21:00—4:00)消纳过剩的风光出力,尤其是在 24:00 的调度时段,废矿抽蓄机组基本处于额定容量抽水蓄能,以减小弃风弃光造成的损失和上级电网消纳夜间风光电源出力的压力。在白天负荷高峰时(7:00 前后和 13:00 前后),废矿抽蓄机组将夜间储存的能量释放,燃气轮机配合废矿抽蓄机组为负荷提供电能。

场景二,即典型日场景下各单元出力对比如图 6 所示。

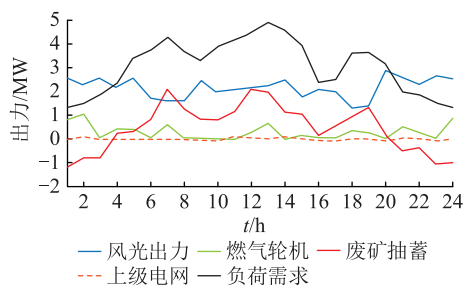


图6 场景二下各单元出力对比

Fig.6 Comparison of each unit output under scene 2

根据图 6 可以得知,相比于强风强光场景,典型日场景风光电源出力存在一定程度的降低,白天负荷高峰期风光电源出力与负荷需求之间的差距和强风强光场景相比进一步拉大。夜间负荷低谷时(23:00—3:00)消纳过剩风光出力的压力减小,而 7:00 前后、13:00 前后和 18:00 前后的负荷高峰期,风光出力无法正常供应负荷。废矿抽蓄电站呈现抽水量远小于发电量,此时需要燃气轮机在白天负荷高峰期配合废矿抽蓄出力满足负荷需求,燃气轮

机出力比强风强光场景下大。

场景三,即弱风弱光场景下各单元出力对比如图7所示。

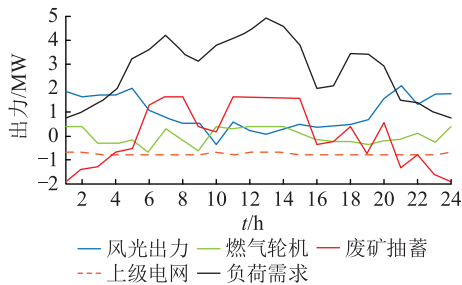


图7 场景三下各单元出力对比

Fig.7 Comparison of each unit output under scene 3

由图7可得,由于风光的随机性和间歇性,该场景下风光出力很低,满足负荷需求的压力很大。由于风光出力和负荷的缺额较大,最大负荷缺额在13:00调度时段内达到将近4 MW,超出废矿抽蓄机组的调节范围。此外,白天还有若干调度时段的负荷缺额在3 MW左右,废矿抽蓄机组受到水量约束制约,联合燃气轮机出力依然无法满足负荷的需求,燃气轮机在白天基本处于额定容量出力。此时矿区配电网系统不得不采取措施,切出部分三级负荷,以保持系统稳定。

表4为多场景优化指标对比,结果表明,引入废矿抽蓄机组下风光利用率较为可观,从经济性考虑,该废矿抽蓄电站容量选择2 MW,可满足该系统稳定运行需求。基于第一节废矿抽蓄电站的建模分析,废矿抽蓄电站参数选取为:流量 $Q=10\text{ m}^3/\text{s}$ ,水头高度 $H=35\text{ m}$ ,库容选取 $2.5\times 10^4\text{ m}^3$ 。

表4 多场景优化指标对比

Table 4 Comparison of multi-scenario optimization indicators

指标	风/光利用系数	废矿抽蓄容量/MW	弃风弃光率/%	负荷缺电率/%	水库容量 $\times 10^4/\text{m}^3$
场景一	0.83/0.35	2	0	0	0.70
场景二	0.62/0.25	2	0	1	2.32
场景三	0.47/0.05	2	0	12.33	2.43

## 4 结语

文中基于高比例可再生能源接入和废矿治理的背景,研究利用废矿建造抽蓄电站,并接入矿区配电网系统服务系统运行。

(1) 设计了废矿抽蓄电站的结构,并进行详细分析;对废矿抽蓄电站进行数学建模,给出电站基本输出功率表达式和抽发工况下功率变化和

的关系式。

(2) 通过分析矿区配电网和废矿抽蓄电站的配置情况,建立了针对废矿抽蓄电站的优化配置模型。

(3) 从系统运行角度,引入废矿抽蓄机组提高了矿区配网的供电可靠性,同时保证了风光利用率,有助于提高新能源发电的装机容量。未来的研究将更加关注在风光渗透率提高的同时所带来的一系列电能质量问题,辅以小容量蓄电池提升系统运行的稳定性。

## 参考文献:

- [1] COSTER E J, MYRZIK J M A, KRUIER B, et al. Integration issues of distributed generation in distribution grids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 28-39.
- [2] GUERRERO J M, BLAABJERG F, ZHELEV T, et al. Distributed generation: toward a new energy paradigm[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1): 52-64.
- [3] 孙冰. 煤矿电网安全稳定运行分析研究[J]. 煤矿机电, 2011, 32(6): 9-16.  
SUN Bing. Study and analysis on safety and stability of coal mine power grid[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2011, 32(6): 9-16.
- [4] SAMI R, KARI M, PEITTL. Adine-eu demonstration project of active distribution network[C]//CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution. Frankfurt, Germany: CIRED, 2008: 1-5.
- [5] 李斌, 吕林, 刘友波, 等. 考虑光伏接入不确定性的主动配电网有功-无功可控资源优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 355-362.  
LI Bin, LYU Lin, LIU Youbo, et al. Optimal configuration of controllable active-reactive power resources in active distribution network considering photovoltaic access uncertainty[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 355-362.
- [6] 李惠玲, 张志强, 唐晓骏. 风电和抽水蓄能联合送出时大型风电最优入网规模研究[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2746-2750.  
LI Huiling, ZHANG Zhiqiang, TANG Xiaojun. Research on optimal capacity of large wind power considering joint operation with pumped hydro storage[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2746-2750.
- [7] PE X, REZ-DI X, AZ J I, et al. Optimal short-term operation and sizing of pumped-storage power plants in systems with high penetration of wind energy[C]//Proceedings of the 7th International Conference on the European Energy Market(EEM). Madrid, Spain, 2010.
- [8] 贾江涛. 一种带抽蓄机组水电系统短期优化调度方法[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1597-1602.  
JIA Jiangtao. An optimal method of short-term scheduling for hydropower system with pumped-storage units[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1597-1602.
- [9] FRANK S B, JONAH G L. Large energy storage systems handbook[M]. London: Taylor & Francis Group, 2011: 69-95.
- [10] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪姣, 等. 协调储能与柔性负荷的主动配

- 电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399.
- SHA Yi, QIU Xiaoyan, NING Xuejiao, et al. Multi-objective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1394-1399.
- [11] 颜宁, 厉伟, 邢作霞, 等. 复合储能 in 主动配电网中的容量配置[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 180-186.
- YAN Ning, LI Wei, XING Zuoxia, et al. Capacity allocation method in active distribution network based on hybrid energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 180-186.
- [12] 艾欣, 李一铮, 王坤宇, 等. 基于混沌模拟退火粒子群优化算法的电动汽车充电站选址与定容[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 9-14.
- AI Xin, LI Yizheng, WANG Kunyu, et al. Locating and sizing of electric vehicle charging station based on chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 9-14.
- [13] 尤子龙, 徐璟, 张丛余, 等. 于小波消噪法的电动汽车直流充电电能计量算法优化[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 15-19.
- YOU Zilong, XU Jing, ZHANG Congyu, et al. Optimization of electric energy metering algorithm for the DC Charging of electric vehicle based on wavelet denoising[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(12): 15-19.
- [14] 黄伟, 李宇坤, 李玖萱, 等. 考虑多利益主体参与的主动配电网双层联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3418-3428.
- HUANG Wei, LI Ningkun, LI Wenxuan, et al. Bi-level joint optimization dispatch of active distribution network considering the participation of multi-stakeholder[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3418-3428.
- [15] 梁亮, 李普明, 刘嘉宁, 等. 抽水蓄能电站自主控制调频控制策略研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3288-3295.
- LIANG Liang, LI Puming, LIU Jianing, et al. Study on the control strategy of pumped storage power station for the frequency regulation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3288-3295.
- [16] HELSETH A, FODSTAD M, MO B. Optimal medium-term hydropower scheduling considering energy and reserve capacity markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1-9.
- [17] 张新燕, 孟瑞龙, 梅生伟, 等. 含大规模风电送端系统对直流系统的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 730-738.
- ZHANG Xinyan, MENG Ruilong, MEI Shengwei, et al. Impact on HVDC systems by the sending AC system with large-scale wind farms [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 730-738.
- [18] 巩宇. 抽水蓄能机组原动机及调节系统参数实测与建模研究[J]. 水电站机电技术, 2011, 34(4): 9-14, 64.
- GONG Yu. Research on modeling and parameter measurement of pumped storage unit prime motor and regulating system[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2011, 34(4): 9-14, 64.
- [19] 李欣然, 邓涛, 黄际元, 等. 储能电池参与电网快速调频的自适应控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2362-2369.
- LI Xinran, DENG Tao, HUANG Jiyuan, et al. Self-adaptation control strategy of battery energy storage participating in fast frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2362-2369.
- [20] 肖斐, 艾芊. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 184-190.
- XIAO Fei, AI Qian. Multiple time-scale optimal dispatch of demand response resource for microgrid based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 184-190.
- [21] 刘芳, 潘毅, 杨军峰, 等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 766-775.
- LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Unit commitment model for combined optimization of wind power-thermal power-pumped storage hydro[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 766-775.

作者简介:



滕松

滕松(1986),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电技术相关工作(E-mail: 5986531@163.com);

刘毅(1992),男,硕士,研究方向为电力系统优化调度及新能源消纳;

钟睿(1995),男,硕士在读,研究方向为新能源消纳及电能质量问题。

附录 A

表 A1 改进的 IEEE14 节点配电网系统结构参数  
Table A1 Structural parameters of improved IEEE14 node distribution network system

首末节点	R/p.u.	X/p.u.	首末节点	R/p.u.	X/p.u.
1—2	0.02	0.06	6—11	0.09	0.10
1—5	0.09	0.02	6—12	0.12	0.16
2—3	0.05	0.18	6—13	0.07	0.13
2—4	0.16	0.22	7—8	0.10	0.18
2—5	0.14	0.10	7—9	0.08	0.11
3—4	0.07	0.17	9—10	0.13	0.08
4—5	0.03	0.04	9—14	0.13	0.17
4—7	0.09	0.08	10—11	0.08	0.19
4—9	0.10	0.12	12—13	0.15	0.20
5—6	0.12	0.16	13—14	0.11	0.15



表 A2 典型日负荷预测数据  
Table A2 Forecast data of typical daily load

时间/h	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8	节点 9	节点 10	节点 11	节点 12	节点 13	节点 14
1	105.750	73.125	27.450	92.700	203.625	103.140	51.912	171.000	115.538	48.330	144.900	100.530	40.500
2	122.760	87.300	37.656	108.576	229.140	119.923	45.742	193.680	133.398	60.350	165.312	117.086	51.840
3	149.400	109.500	53.640	133.440	269.100	146.208	57.730	229.200	161.370	79.176	197.280	143.016	69.600
4	189.450	142.875	77.670	140.820	329.175	185.724	75.753	282.600	203.423	107.478	245.340	181.998	96.300
5	274.900	220.750	144.940	253.240	437.350	270.568	96.205	383.200	291.145	179.596	339.880	266.236	166.600
6	302.350	243.625	161.410	278.860	478.525	297.652	108.558	419.800	319.968	198.994	372.820	292.954	184.900
7	343.750	278.125	186.250	317.500	540.625	338.500	127.188	475.000	363.438	228.250	422.500	333.250	212.500
8	295.150	237.625	157.090	272.140	467.725	290.548	105.318	410.200	312.408	193.906	364.180	285.946	180.100
9	265.900	213.250	139.540	244.840	423.850	261.688	92.155	371.200	281.695	173.236	329.080	257.476	160.600
10	334.300	251.950	197.050	301.360	471.550	349.672	106.465	339.000	353.515	224.500	411.160	299.164	169.600
11	361.600	273.400	214.600	326.320	508.600	399.440	117.580	184.960	382.180	244.000	443.920	323.968	276.600
12	386.380	292.870	230.530	348.976	542.230	403.835	127.669	333.400	408.199	261.700	473.656	346.482	199.360
13	434.260	330.490	261.310	392.752	607.210	453.630	147.163	241.800	458.473	295.900	531.112	389.985	226.720
14	410.740	312.010	246.190	371.248	575.290	429.170	137.587	208.200	433.777	279.100	502.888	368.615	213.280
15	321.700	242.050	188.950	289.840	454.450	336.568	101.335	481.000	340.285	215.500	396.040	287.716	162.400
16	194.860	142.390	107.410	173.872	282.310	204.654	49.693	299.800	207.103	124.900	243.832	172.473	89.920
17	206.200	151.300	114.700	184.240	297.700	216.448	54.310	316.000	219.010	133.000	257.440	182.776	96.400
18	293.160	230.340	188.460	268.032	397.860	304.886	119.358	418.800	307.818	209.400	351.792	266.357	167.520
19	294.000	231.000	189.000	268.800	399.000	305.760	119.700	420.000	308.700	210.000	352.800	267.120	168.000
20	251.505	209.588	150.903	234.738	377.258	248.152	113.177	335.340	264.080	177.730	301.806	244.798	167.670
21	157.410	102.465	98.835	135.432	248.985	167.666	82.396	267.300	170.231	106.150	208.692	133.967	47.520
22	149.400	109.500	53.640	133.440	269.100	146.208	67.730	229.200	161.370	79.176	197.280	143.016	69.600
23	122.760	87.300	37.656	108.576	229.140	119.923	55.742	193.680	133.398	60.350	165.312	117.086	51.840
24	105.750	73.125	27.450	92.700	203.625	103.140	51.912	171.000	115.538	48.330	144.900	100.530	40.500

表 A3 配电网系统优化结果  
Table A3 Distribution network system optimization results

接入节点	废矿抽蓄装机 1 MW			废矿抽蓄装机 2 MW			废矿抽蓄装机 3 MW		
	场景一	场景二	场景三	场景一	场景二	场景三	场景一	场景二	场景三
1	3.088 5	2.948 8	2.974 6	2.951 8	2.352 9	2.263 5	2.916 4	2.228 0	2.009 9
2	3.080 4	3.048 5	3.101 0	2.960 3	2.447 9	2.209 9	2.960 3	2.361 3	1.784 7
3	3.116 2	2.987 3	3.174 5	2.945 3	2.494 4	2.221 8	2.945 3	2.391 4	1.987 1
4	3.144 4	3.045 7	3.112 5	2.925 8	2.358 2	2.200 4	2.925 8	2.309 6	1.834 5
5	3.125 2	2.983 8	3.033 6	2.957 7	2.445 3	2.225 5	2.957 7	2.285 5	1.973 9
6	3.154 3	3.013 9	3.130 8	2.950 1	2.332 5	2.159 2	2.950 1	2.332 5	2.059 2
7	3.122 3	3.058 6	3.092 2	2.933 4	2.424 9	2.289 6	2.933 4	2.324 9	1.926 3
8	3.104 6	3.026 3	3.131 4	2.947 2	2.374 7	2.210 9	2.918 6	2.374 7	2.025 8
9	3.106 5	2.931 6	3.117 1	2.923 4	2.325 4	2.158 5	2.913 4	2.258 6	1.858 5
10	3.119 8	2.923 8	3.060 9	2.959 9	2.339 9	2.181 1	2.959 9	2.339 9	1.864 1
11	3.125 1	3.069 5	3.101 9	2.943 0	2.458 7	2.251 2	2.943 0	2.232 3	2.002 2
12	3.070 5	2.978 4	3.071 5	2.944 5	2.415 4	2.227 4	2.944 5	2.315 4	1.835 2
13	3.084 7	2.939 5	3.139 9	2.951 3	2.497 1	2.186 0	2.951 3	2.312 8	1.966 6
14	3.124 2	3.034 4	3.072 0	2.942 6	2.456 4	2.214 5	2.942 6	2.255 6	1.807 1

(下转第 103 页)