

文章编号: 2095-2163(2020)09-0203-06

中图分类号: TM732

文献标志码: A

基于正交逐步优化算法的智能电网储能优化

许有为, 高岩

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要: 本文提出了一种基于正交优化学习算法的分时段模型, 用于解决智能微电网中电力资源和电力存储设备的不确定性问题以及 POA 导致的“维数灾”问题。OPOA(正交逐步优化算法)结合正交方法, 对多目标函数进行阶段、状态、空间三维求解, 将多阶段问题合理分为便于计算的若干子问题, 以构建的目标函数作为指标, 电力储能设备作为因素, 离散调度状态作为因素水平, 将多次正交变换作为子问题优化求解, 在不改变电力调度最大化的基础上, 有效的缩小电力储能装置的调度时间, 获得最优解。

关键词: 智能微电网; OPOA; 储能设备; 正交变换

Energy storage optimization of smart grid based on orthogonal stepwise optimization algorithm

XU Youwei, GAO Yan

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] In this paper, a time division model based on orthogonal optimization learning algorithm is proposed to solve the uncertainty problems of power resources and power storage devices in smart microgrid and the "dimension disaster" caused by POA. OPOA (orthogonal step-by-step optimization algorithm) combines the orthogonal method to solve the multi-objective function in three dimensions of stage, state and space. The multi-stage problem is reasonably divided into several subproblems which are convenient for calculation. Taking the constructed objective function as the index, the electric energy storage equipment as the factor, the discrete dispatching state as the factor level, and the multiple orthogonal transformation as the subproblem optimization solution, it is feasible to optimize the multi-stage problem in the future on the basis of changing the maximization of power dispatching, the dispatching time of electric energy storage device is effectively reduced, and the optimal solution is obtained.

[Key words] Smart microgrid; OPOA; Energy storage equipment; Orthogonal transformation

0 引言

传统能源日益短缺, 环境污染日趋严重, 风力、太阳能等新能源发电近年来发展迅速。2016年通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》描绘了中国未来五年能源发展向绿色转型积极适应新常态的基本愿景, 提出更加重视新能源, 继续大力支持风电、光电发展, 加快发展生物质能、地热能, 积极开发沿海潮汐能资源^[1-2]。新能源发电的研究已经成为制定实时电价策略的一个重要内容。当前, 越来越多的需求响应 RES 和储能设备集成到当前的主电网中, 将这些分布式 RES 和储能设备与微电网相结合, 有利于提高智能电网的可靠性和弹性^[3]。但是, 因为可再生能源与负载能量消耗的不确定性, 供给侧与需求侧的供需平衡很难得到一个合理的解决方案。微电网是包含 RES 和已调度资源的能源系统, 可以独立运行以提

高效率^[4]。此外, 智能微电网可以与主电源系统连接, 可以进入电力市场, 出售额外的 RES 和可调度资源或从外部电网购买电力, 如何最大化调度电力储能设备就显得尤为重要。优化调度不仅可以节约能源减少火、煤发电量, 还可以增大用户对于电力供应商的满意度。

正交逐步优化算法(OPOA), 作为一种动态规划算法, 是对逐步优化算法的改进。虽然逐步优化算法可以将多阶段决策的问题划分为若干个双阶段问题, 以及提高优化的效率^[5]。但是随着电网规模的不断扩大, 用电设备的极速增加, 逐步优化算法也会面临“维数灾”的大问题。本文研究的最大化调度储能设备的目标函数满足凸函数的特征, 结合正交逐步优化算法, 可以有效地解决该问题。

1 微电网系统介绍

微电网(Micro-Grid)也译为微网, 是指由分布

作者简介: 许有为(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能电网定价机制; 高岩(1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能电网机制、系统工程、非光滑优化。

通讯作者: 高岩 Email: gaoyan@usst.edu.cn

收稿日期: 2020-07-18

式电源、储能装置、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等组成的小型发电系统^[6]。

微电网设计目的是实现多种功率电源的灵活分布,通过高效率的算法或者优化结构来解决智能电网的多种形式的数字化问题。开发和延伸智能电网的相关技术,不仅能够优化分布式电源的分布,还可以实现可再生能源的大规模接入,进而实现对多种电力储能设备的能源供给,是实现主动式接入配电网的一种有效管理方式,从而有效的促进传统电网向智能电网的过渡。典型的微电网结构中,能量存储装置假定在电源和负载之间的功率平衡,如图1所示,从而保证了整个微电网的稳定运行。

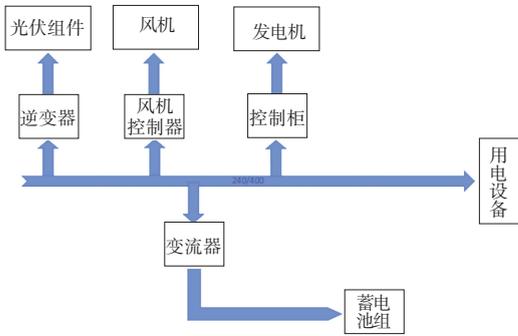


图1 微电网结构

Fig. 1 Microgrid structure

2 储能设备电力调度模型

2.1 储能系统介绍

为了对电力储能设备中的电力资源数据分析优化,确定问题研究发展的对象而划出的部分物体或空间范围,称为储能系统。其包括能量和物质的输入和输出,能量转换和储存设备。储能系统设计往往涉及多种能量、多种设备、多种物质、多个发展过程,是随时间变化的复杂能量管理系统,需要多项技术指标来描述它的性能。常用的评价标准主要表现在能量密度、电力储存大小,能源存储效率和存储的价格,以及对环境造成的影响等方面^[7]。不同的应用目的有不同的储能要求,一个好的储能系统的共同特点如下:

(1) 每单位体积(存储密度的体积)存储的能量大,即超高能量存储系统成为可能;

(2) 具有良好的负荷调节性能。能量储存系统在使用中,可以按照需求调整负载的性能,释放能量的大小决定了系统性能的优劣;

(3) 能源电力存储时效率高,要求电力储能设备长时间保持高效率的能量存储;

(4) 系统具有成本低、长期发展、运行安全可靠;

太阳能锂电池具有单位能量密度大、性价比高、具有很好的电力负载调节能力。综上,本文选择太阳能锂电池储能设备作为研究对象。

2.2 目标函数

构建光伏发电系统中的电力储能最大化模型,一个光伏发电设备对应一个储能设备*i*。数学描述:已知优化调度期内的各个储能设备的初始电量,储能设备的最大电力存储量以及储能设备间的电力调度过程*Z*,综合考虑光伏系统的能量转换效率和输出电力等多种约束条件,使优化调度期间的发电量最大化。目标函数为式(1):

$$\max E(Z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T A_i Q_{i,j} t_j, \quad (1)$$

其中,*E*可以看作是某个微电网中最大可调度电量,单位 $\text{kW} \cdot \text{h}$; *N* 是储能设备数目; *i* 是储能设备序号; *j* 是时段序号; t_j 是时段 *j* 的小时数, $j = 1, 2, 3, \dots, T$; *T* 是可调度时间段; $Q_{i,j}$ 表示第 *i* 个设备在 *j* 时段的峰值功率; A_i 是第 *i* 个设备电力转化系数。

2.3 约束条件

在构建目标函数后,综合考虑多种因素后,建立目标函数的约束条件如下:

(1) 始末电量约束,式(2)和式(3):

$$Z_{i,0} = Z_i^0, \quad (2)$$

$$Z_{i,T} = Z_i^f. \quad (3)$$

其中, Z_i^0 、 Z_i^f 分别表示储能设备 *i* 的初始电量和额定电量,单位 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(2) 光伏组件的发电量,式(4):

$$Q_{i,j} = a \times H_{i,j} / F \times y \times \eta / 365 \times 3.6. \quad (4)$$

其中, $Q_{i,j}$ 表示第 *i* 个设备在 *j* 时段的峰值功率(标定条件:光照强度 1000 W/m^2 , 温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 大气质量 AM1.5); *a* 是全年平均每天光伏发电量与用电量之比, $1 \leq a \leq d$; η 是发电系统综合影响系数; 设 $y = \text{倾斜光伏组件上的辐射量} / \text{水平面上辐射量}$ 。

(3) 电量平衡方程,式(5)、式(6):

$$C_{i,j+1} = C_{i,j} + \alpha \times (I_{i,j} - Q_{i,j} - S_{i,j}) t_j, \quad (5)$$

$$I_{i,j} = V_{i,j} + \sum_{i,j} (Q_{i,j} + S_{i,j}). \quad (6)$$

其中, $C_{i,j}$ 是电力储能设备 *i* 在时段 *j* 的电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $V_{i,j}$ 、 $S_{i,j}$ 分别为电力储能设备 *i* 在时段 *j* 时间段内的可流动电量和损耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(4) 单个储能设备电容量约束,式(7)、式(8):

$$z_i^0 \leq Q_{i,j} \leq z_j^0, \quad (7)$$

$$0 \leq E(Z) \leq NZ_i^f. \quad (8)$$

式中: $Q_{i,j}$ 和 $E(Z)$ 单位是 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(5) 储能设备电力流量约束,式(9):

$$m_{i,j} \leq Q_{i,j} + S_{i,j} \leq M_{i,j}. \quad (9)$$

式中, $m_{i,j}$ 和 $M_{i,j}$ 分别为光伏设备 i 在 j 时段的发电量上、下限,单位 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3 逐步优化算法(POA)

3.1 逐步优化算法对于储能设备的优化调度

逐步优化学习算法是把多阶段的问题分解为多个二阶段的子问题,每次计算的变量之间都是根据上一阶段固定的,目前只是通过一个优化结构来调整当前二个阶段的变量,然后把当前优化的结果作为下一次优化的初始条件,依次类推直到计算结果收敛。本文状态变量的存储设备容量的能量存储装置。计算方法步骤如下:

(1) 确定每个设备在调度期内的初始值;

(2) 设 $t = T - 1$;

(3) 固定其余时间阶段各储能设备电量,调整各储能设备的电量,使得时段 $t - 1$ 和时段 t 内的设备群发电量之和达到最优;

(4) 令 $t = t - 1$,如果 $t > 0$,则转至步骤(3);否则转至步骤(5);

(5) 判定是否收敛,若满足收敛条件则终止计算;否则转至步骤(2)。

3.2 求解过程的分析

将储能设备的电量变化序列 Z 用二维矩阵来表示,各储能设备在时间序列 t 的状态向量表示为 $Z_t = [Z_{1,t}, \dots, Z_{i,t}, \dots, Z_{N,t}]^T$ 。另外可将时间序列 t 的所有储能设备状态量表示成状态集合 S_t ,逐步优化算法在某一时间段 t 的寻优过程可以看作是为分别固定时段 $t - 1$ 和时段 $t + 1$ 状态向量 Z_{t-1} 与 Z_{t+1} 后,对 S_t 所有元素进行计算,从中选取最优状态向量 Z_t^* ,寻优示意如图2所示。

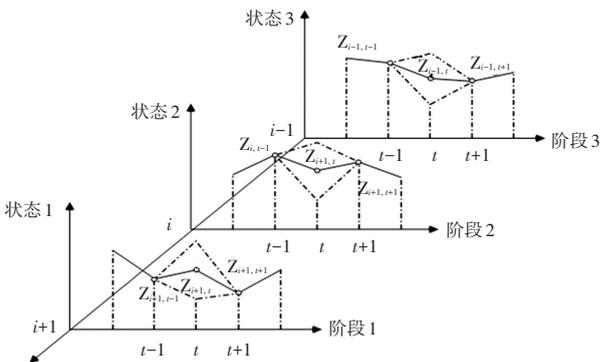


图2 寻优示意图

Fig. 2 Schematic of optimization

若将储能设备的电量作为连续变量处理, S_t 则表示为无穷集合,进而导致严重的“维数灾”问题;若对每一个电力储能设备存储的电量进行离散处理,则 S_t 为式(10)所示的有限集合。随着电力储能设备数目的增加,其离散数目也会逐渐递增, S_t 基数仍呈指数增长,以 N 设备状态离散数目均为 2 的储能设备为例,由式(12)可知 S_t 基数为 2^N ,意味着每增加 1 个储能设备,存储量会增加 2 倍,这是仍会产生“维数灾”问题;同时 S_t 中各元素均涉及储能设备调节计算、目标函数及惩罚函数值的计算。计算 S_t 中的每一个元素,需要十分繁杂的运算,进而导致高延迟的计算。假设对储能设备进行离散处理获得离散集合 S_t , S_t 看做有限集合。这时假设一个小型微电网有 2 个储能设备,时间 t 均离散二个状态,分别为 $\{Z_{1,t}^1, Z_{1,t}^2\}$, $\{Z_{2,t}^1, Z_{2,t}^2\}$, $\{Z_{3,t}^1, Z_{3,t}^2\}$, 那么有限集合表示为 $S_t = \{S_t^1, S_t^2, S_t^3, S_t^4\} = \{[Z_{1,t}^1, Z_{2,t}^1], [Z_{1,t}^1, Z_{2,t}^2], [Z_{1,t}^2, Z_{2,t}^1], [Z_{1,t}^2, Z_{2,t}^2]\}$, 由此可见有限集合中的每一个元素都是时间序列 t 的一种离散组合。类推到 N 个储能设备时,集合 S_t 中的任意二个元素都要相互独立,意味着各个离散组合之间并无直接的联系。集合 S_t 选取的部分是代表总体特征的样本元素,进而提高计算的速度和效率^[8]。

$$S_t = \{S_t^1, \dots, S_t^m, \dots, S_t^X\}. \quad (10)$$

$\forall l, m \in (1, 2, 3, \dots, X), l \neq m$ 且 $S_t^l, S_t^m \in S_t, S_t^l \cap S_t^m = \varphi$.

$$\text{其中: } S_t^m = [Z_{1,t}^m, \dots, Z_{i,t}^m, \dots, Z_{N,t}^m]. \quad (11)$$

$$X_t = \prod_{i=1}^N k_i, t. \quad (12)$$

其中: S_t^m 为 S_t 的第 m 个元素; $Z_{i,t}^m$ 是储能设备 i 在时段 t 的储电量; X_t 为 S_t 基数; $K_{i,t}$ 是储能设备 i 在时段 t 的状态离散数目。

4 正交逐步优化算法(OPOA)

4.1 可行性正交背景

日本著名的统计学家田口玄一将正交试验选择的水平组合列成表格,称为正交表。正交表是一整套规则的设计表格,用 L 为正交表的代号; n 为试验的次数; t 为水平数; c 为列数,也就是可能安排最多的因素个数^[9]。

4.2 正交试验设计

正交试验设计的关键在于试验因素的安排。通常,在不考虑交互作用的情况下,可以自由的将各个因素安排在正交表的各列,只要不在同一列安排两

个因素即可(否则会出现混杂)。但是当要考虑交互作用时,就会受到一定的限制,如果任意安排,将会导致交互效应与其它效应混杂的情况。因为因素所在列是随意的,但是一旦安排完成,试验方案即确定,之后的试验以及后续分析将根据这一安排进行,不能再改变^[10-12]。

作为进行正交试验的最重要的因素就是正交表,一般情况下把表分成等水平正交表和混合水平正交表。对于等水平正交表,因为其易于构建和方便使用,通常选择 $L_n^u(n^q)$ 来构造,其中 L 则表示正交表, n 是因素水平数,限定为素数(譬如 2 或 3 等)或者是素幂数(譬如 2^2 或 3^2 等);基本列数用字母 u 表示,可取任意的正整数; n^u 表示所有的试验次数; q 表示正交实验因素的上限, $q = (n^u - 1)/(n - 1)$ ^[12]。

根据上述说明可知因素水平数 n 均为 3 并且只需要进行 4 次试验就可以得到实验结果,见表 1。不同水平根据表 1 可知出现了 3 次,因素(I、II、III、IV)中任意二因素不同水平构成的有序数对均 1 次。综上可知正交表可以大幅度减少试验方案(表 1 因素的全部试验次数是 3^4 ,也就是 81 次),同时兼顾了方案的均匀性、分散性以及整齐可比性。

表 1 $L_9(3^4)$ 正交表

Tab. 1 $L_9(3^4)$ orthogonal array

试验号	列号			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4.3 OPOA 与 POA 的维度计算对比

假设状态离散数目为 3,微电网有 80 个储能设备,计算数据以双精度存储。可知 POA 基数高达 3^{80} ,表现为 $3^{80} \times 80$ 的二维矩阵,根据计算可知数据存储高达 $3^{80} \times 80 \times 8 \div 1\ 024 \div 1\ 024 \div 1\ 024$ 大约 1.1×10^{30} GB,严重超出目前绝大多数计算机的存储能力,并且运算时间也是一个巨大的考验;然而 OPOA 集合基数仅仅是 243,需要计算的数据很小,需要 $243 \times 80 \times 8 \div 1\ 024$ 大约 152 KB 的存储空间。由此可

见 OPOA 比 POA 更适合本实验。随着电力储能设备 N 的增加 POA 的集合基数呈幂指数增加,当 N 较大时 POA 的集合基数远大于 OPOA 的集合基数,见表 2。

表 2 离散状态数目为 3 时 OPOA 与 POA 子问题集合基数

Tab. 2 Comparison of cardinality between OPOA and POA sub-problem sets when the discrete number of states is 3

储能设备数 N	1	2-4	5-13	14-40	41-121	122-364	365-500
POA					3^N		
OPOA	3	9	27	81	243	729	2 187

4.4 正交逐步优化算法(OPOA)计算步骤

- (1) 根据精度要求设置 ε 、 A 的值,各储能设备的步长上限 $\bar{h}_{i,t}$ 以及储能设备离散状态数目 k 等参数;
- (2) 根据电力储能设备数目 N 及 k 来构建合适的正交表 L ;
- (3) 确定各个储能设备的初始电量 Z^0 ;
- (4) 令时间 $t = T - 1$,构建状态向量 $Z_t^0 = [Z_{1,t}^0, \dots, Z_{N,t}^0]^T$,设置电力储能设备的步长上限 $h_t^0 = [h_{1,t}^0, \dots, h_{N,t}^0]^T$;
- (5) 根据 Z_t^0 、 h_t^0 以及正交表 L 来构建状态向量 S^t ;
- (6) 用惩罚函数计算(5)中的状态向量 S^t 包含的各个状态变量的目标函数;
- (7) 对正交实验结果进行极差分析,进而获得最优解 $Z_t^1 = [z_{1,t}^1, \dots, z_{N,t}^1]$;
- (8) 如果 $E(Z_t^1) < E(Z_t^0)$,转步骤(9);否则转步骤(10);
- (9) 如果 $\max_{1 \leq i \leq N} h_{i,t}^0 > \varepsilon$ 则缩小步长,令 $\forall_i h_{i,t}^0 = h_{i,t}^0/2$,转步骤(5);否则转(10);
- (10) 根据上述计算判断 $\max_{1 \leq i \leq N} |Z_{i,t}^1 - Z_{i,j}^0| \ll \varepsilon$,是否满足,满足转步(10);否则令 $Z_t^1 = Z_t^0$,转步骤(5);
- (11) 令 $t = t - 1$,转到步骤(5);否则转步骤(12);
- (12) 此时储能设备电量变化为 Z^1 ,进一步判断 $\Delta = \max_{1 \leq i \leq N} \max_{1 \leq j \leq T} |Z_{i,t}^1 - Z_{i,j}^0| \ll \varepsilon$,满足转到步骤 13;否则令 $Z^0 = Z^1$,转到步骤(4);
- (13) 计算结束,输出最优化电量。

5 应用实例分析

5.1 计算依据

部分区域的辐射量与日照时间的关系,见表 3。考虑到平均日照时间的长短,本文选取西藏地区作为参考区域。

表 3 中国不同地区水平面上光辐射量与日照时间资料

Tab. 3 Data of light radiation and sunshine time on horizontal plane in different areas of China

地区类别	地区	年平均光辐射量 F		年平均光照 时间 H/h	年平均每天辐射量 $f(MJ/m^2)$	年平均每天光照 时间 H_1/h	年平均每天 $1\text{ kw}/m^2$ 峰光照时间 H^2/h
		MJ/m^2	Kwh/m^2				
一	宁夏北部、甘肃北部、新疆南部、青海西部、西藏西部、(印度、巴基斯坦北部)	6680-8400	1 855-2 333	3 200-3 300	18.3-23.0	8.7-9.0	5.0-6.3
二	河北、山西、内蒙、宁夏、甘肃、青海、西藏、新疆	5 852-6 680	1 625-1 855	3 000-3 200	16.0-18.3	8.2-8.7	4.5-5.1
三	山东、河南、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、江苏北部、安徽北部、	5 016-5 852	1 393-1 625	2 200-3 000	13.7-16.0	6.0-8.2	3.8-4.5
四	四川、贵州	3 344-4 190	928-1 163	1 000-1 400	9.16-11.5	2.7-3.8	2.5-3.2

5.2 理论计算

(1) 昌都地处西藏东南部, 查表 3, 年平均辐射量为 $1\ 625-1\ 855\text{ kwh}/m^2$, 取 $F = 1\ 700\text{ kwh}/m^2$ 或 $h_1 = 4.6\text{ h}$;

(2) 年发电量 $Q = P_m \times F \times y \times \eta / 1\text{ Kw} = 30\text{ kwp} \times 1\ 700\text{ kwh} \times 1.1 \times 0.54 / 1\text{ kw} = 30\ 294(\text{ kwh})$;

(3) 每天发电量 $g = Q/365 = 30\ 294/365 = 83(\text{Kwh})$ 。

5.3 POA 以及 OPOA 数值计算结果

计算得到的每天发电量作为目标函数的最大值, 结合正交优化的计算方法和约束条件, 得到平均一天不同离散状态下 POA 与 OPOA 发电量及其计算时间对比的计算结果, 见表 4。

表 4 平均一天储能设备在不同离散状态下 POA 与 OPOA 计算结果

Tab. 4 Comparison of POA and OPOA power generation and calculation time in different discrete states in an average day

状态离散数目 k	发电量/(亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$)				计算耗时/ ms			
	POA	OPOA	绝对差值	相对差值/%	POA	OPOA	绝对差值	相对差值/%
2	79.45	79.68	0.23	0.002 894 9	30	28	2	0.066 666 67
3	82.56	82.46	0.1	0.001 211 24	316	130	186	0.588 607 59
5	82.55	82.49	0.06	0.000 726 83	1 789	369	1 420	0.793 739 52
7	82.67	82.65	0.02	0.000 241 93	5 743	578	5 165	0.899 355 74
11	82.67	82.66	0.01	0.000 120 96	30 447	798	29 649	0.973 790 52
13	82.67	82.68	0.01	0.000 120 96	56 790	1 034	55 756	0.981 792 57
19	82.67	82.67	0	0	617 685	1 568	616 117	0.997 461 49

根据表 4 可知, POA 以及 OPOA 在 k 较小时, 计算结果与实际理论计算差距较大; 但是随着 k 的增加, POA 和 OPOA 都逐渐收敛, 并且计算出了最优解, 结果与实际理论计算相差不大; 但是 POA 与 OPOA 因为实验方式的不同, 导致二者计算时间差距明显, 尤其是当 k 是 19 的时候二者耗时相差 61 6117 ms 。由此可见 OPOA 明显优于 POA, 不仅可收敛至局部最优解, 还兼顾了时延低的特点, 具有较好的收敛性以及稳定性。

6 结束语

随着中国电力系统的不断扩大, 智能微电网将成为未来电网的发展方向, 如何最大化调度绿色能源产生的电力存储就显得尤为重要。本文根据成熟的正交实验, 采用逐步正交优化算法, 可以最大化解智能微电网中储能设备的电力调度问题, 未来进一步改进可以应用到总网中; 未来 OPOA 算法也会成为智能电网研究调度优化绿色能源的研究方向, 也会为未来智能电网的实施定价策略提供一种可行的收敛方法。(下转第 213 页)