

# 基于无线传感网络的园区综合能耗实时监测方法

杨尔欣<sup>1</sup>, 周进艳<sup>1</sup>, 卜小伟<sup>1</sup>, 王从杰<sup>1</sup>, 马文纹<sup>2</sup>, 王星龙<sup>3</sup>

(1. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730000;

2. 国网甘肃省电力公司酒泉供电公司, 甘肃 酒泉 735000;

3. 国网思极飞天(兰州)云数科技有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 为了及时反馈园区能耗数据, 精准分析园区能源消耗情况, 提出基于无线传感网络的园区综合能耗实时监测方法。选取网格型组网方式的 ZigBee 无线传感网络, 并设计路由器节点、协调器节点和终端节点为该网络节点, 以 S-LEACH 路由协议为网络传输机制, 通过簇间多跳数据转发确保网络信息的低功耗传输; 将该 ZigBee 无线传感网络作为园区综合数据采集前端, 通过网络子节点、中转节点、主节点层层递进方式将计量仪表采集数据传输至后台计算机监测部分, 数据监测模块利用 COM 端口预处理 ZigBee 网络数据, 并通过决策树算法实现异常能耗数据的监测, 利用数据管理模块可视化呈现能耗监测结果。测试结果表明, 该方法选用 S-LEACH 作为无线传感网络传输机制可降低数据传输能耗、提升网络生命周期; 该方法能耗监测灵敏度高、可视化效果好, 可依据监测结果精准分析园区用电消耗情况。

**关键词:** 无线传感网络; 园区综合能耗; 实时监测; 网格型组网; S-LEACH

中图分类号: TP277 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)03-0088-06

## Real-time Monitoring Method of Comprehensive Energy Consumption in Industrial Park Based on Wireless Sensor Network

YANG Er-xin<sup>1</sup>, ZHOU Jin-yan<sup>1</sup>, BU Xiao-wei<sup>1</sup>, WANG Cong-jie<sup>1</sup>, MA Wen-wen<sup>2</sup>, WANG Xing-long<sup>3</sup>

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000 China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company Jiuquan Power Supply Company, Jiuquan 735000 China;

3. State Grid Siji Feitian (Lanzhou) Cloud Data Technology Co., Ltd., Lanzhou 730000 China)

**Abstract:** In order to timely feedback the energy consumption data of the park and accurately analyze the energy consumption of the park, a real-time monitoring method of the comprehensive energy consumption of the park based on the wireless sensor network is proposed. The ZigBee wireless sensor network with grid networking mode is selected, and the router node, coordinator node and terminal node are designed as the network node, and the S-LEACH routing protocol is used as the network transmission mechanism, and the low-power transmission information of network is ensured by multi-hop data forwarding between clusters. The ZigBee wireless sensor network is used as the front end of comprehensive data acquisition in the park, and the data collected by the metering instrument is transmitted to the background computer monitoring part through the network sub-nodes, transit nodes, and main nodes. The module uses the COM port to preprocess the ZigBee network data, and realizes the monitoring of abnormal energy consumption data through the decision tree algorithm, and uses the data management module to visualize the energy consumption monitoring results. The test results show that this method selects S-LEACH as the transmission mechanism of wireless sensor network, which can reduce the energy consumption of data transmission and improve the network life cycle.

**Keywords:** wireless sensor network; comprehensive energy consumption of the park; real time monitoring; grid networking; S-LEACH

## 0 引言

目前, 在园区综合能耗管理时存在能源监测数据反馈不及时, 能源利用不合理, 能源消耗过高等现象<sup>[1-2]</sup>。对能源消耗的分析和管理造成严重影响, 造成园区综合能源消耗分析效率低, 影响园区综合能耗管理。为此园区综合能耗的实时监测十分重要<sup>[3]</sup>。

针对此问题, 马智亮等人运用 BIM 模型完成能耗数据监测, 虽然降低能耗监测成本, 但无法实现能耗的全方位监测<sup>[4]</sup>, 曹礼勇等人结合 BLE 和 Wi-Fi 进行能耗监测, 通过合理的线路布设缩减数据采集能耗, 但却在一定程度上降低了信息传输效率, 降低监测实时性<sup>[5]</sup>。

由于园区结构复杂, 传统监控方式无法灵活监测且成本较大, 无线传感网络技术可通过节点间的分布式协作, 有效弥补这一劣势<sup>[6-7]</sup>, 更好地采集数据, 有效提高园

区综合能耗实时监测的效率<sup>[8]</sup>。

因此本文提出基于无线传感网络的园区综合能耗实时监测方法。实现对园区综合能耗全面、高效的管理。

## 1 园区综合能耗实时监测

### 1.1 无线传感网络组成及原理

#### 1.1.1 网络选用

ZigBee 技术可解决成本高、复杂度高、传输率低等问题,同时可实现近距离设备快速、稳定联网。本文的自组织无线网络采用网状结构,依据 802.15.4 协议栈塑造 ZigBee 规范。因园区复杂的建筑结构,采用星型组网和属性组网很困难,所以最佳选择是网格型组网。园区大功率设备的综合能耗信息通过网格型组网节点向上位机传输。可用于长距离的散点排列结构、网络容量大且适用于长物理区域,采用多跳式路由由通信实现信息传输<sup>[9-10]</sup>,这些都是网状结构特点,其具体网状结构用图 1 描述。

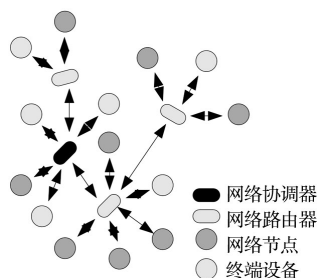


图1 网状结构示意图

ZigBee 的网状结构网络具备自愈、自组织功能,烦琐的网络也可在该结构下建成,在通信领域内网络所有实体都能实现相互信息传输,也可用“多跳级”方式在没有直接通路的情况时进行信息传输。

动态路由方式是被自组织网选取的,基于全部通道中通道距离最短原则挑选数据实时传送通道,而不是在网络内提前设置数据传送路径,这就是动态路由。采用“梯度法”进行路径选取的原则为,选距离最短的通道将数据输送至目标位置,若不通,再选择另外稍长的一条路径,以此类推送达为止。动态路由结合网状结构可以处理在实际园区数据传送中产生的各种突发情况,保证了数据传送的稳定性。

#### 1.1.2 网络节点设计

路由器、协调器和终端三种节点共同构成网络节点,保证网络内功能多样化。为保证设计节点经济实用并且将传感器网络功耗降到最低,在系统内集成 DMA、flash 内存、ARM 单片机等,由图 2 表示。采集 RS-232/485 信号或传感器信号需要将数字量和模拟量的输入通道预先设置完成,数据传送部分和信号采集部分构成终端节点。其中功率因数、电流和电能等参量是信号采集部分获取

的监测设备数据。

协调器节点和路由器节点对节点唤醒,网络组建、网络路由和网络初始化实行操作,不检测实际的物理数据,以此避免因局部节点电量耗尽导致的网络失效,最终实现功耗最小化以及网络使用年限最大化目标。

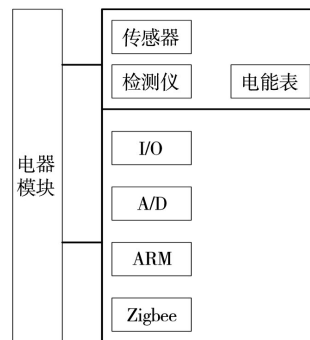


图2 终端模块原理简图

### 1.2 基于 S-LEACH 路由协议的园区能耗数据传输机制

无线传感网络采用 S-LEACH 路由协议进行园区能耗数据的传输,可使园区能耗数据信息传输稳定性更高,信息数据采集总量更大,同时降低无线传感网络整体运行能耗,提升网络的生命周期。

#### 1.2.1 节点状态信息采集与能耗数据传输

当无线传感网络的数据传输状态是平稳时,S-LEACH 路由协议簇内每个普通节点会在工作时打开发送装置,进行园区能耗数据传送,不工作时关闭发送装置进入休眠模式。

稳定状态 S-LEACH 路由协议包含多个 TDMA 帧且持续时间较长。在每个 TDMA 帧内,簇头节点接收其他节点发来的能耗数据,进行压缩后,在此 TDMA 帧的最后一刻发送给 Sink 节点,完成一帧能耗数据的传送。节点在每一轮的最后一个 TDMA 帧,同时报告当前状态信息,Sink 节点将依照收集到的节点状态信息情况进行下一轮簇的划分,以此减少能源消耗。

节点进行能耗数据传送的前提条件是收集自身状态信息:普通节点将本轮最后一个 TDMA 帧中的感知数据和自身状态信息发给簇头节点,簇头节点将经过合并的本簇信息和自身状态信息发送给 Sink 节点,过程中必然消耗能量,本文通过剩余能量预测机制,高精度收集节点当前能量状态信息,算法如下所示:

$$E_r = E_c - E_{Tx} \quad (1)$$

式中,  $E$  代表能量;下角标  $r$ 、 $c$ 、 $Tx$  分别表示:本轮工作结束最终剩余能量、节点当前剩余能量、此次数据传输将消耗的能量。

#### 1.2.2 基于多跳的簇间路由低功耗数据传输

本文S-LEACH路由协议采用以降低传送耗能为目标的簇间路由选择机制,可在第一轮后将簇间互通方式升级为多跳转发能耗数据的方式<sup>[11]</sup>。簇间和簇内在首轮均采用单跳通信手段传输能耗数据,次轮簇间的路由选择方案切换成多跳转发,以保证能够以最低能耗进行数据传输。

设次轮网络中有k个簇头节点,通过模拟退火算法从中筛选出k个最优簇头节点,按照距离由远及近顺序排列Sink节点和k个最优簇头节点,即若有簇头节点CH<sub>1</sub>、CH<sub>2</sub>、...CH<sub>k</sub>,则存在下列关系:

$$d_{CH_1\_toSink} \geq d_{CH_2\_toSink} \geq \dots d_{CH_k\_toSink} \quad (2)$$

最小能量路由协议在选取路由时通常仅探讨数据传输功率消耗,疏忽数据收集所消耗功率。在此本文将两种能耗合并思考,其中路由节点必要选择条件须保证总能量消耗E<sub>A</sub>最低,表达式为:

$$E_A = \sum_i (E_{Tx} + E_{Rx}) \quad (3)$$

式中:i表示数据转发数量;E<sub>Rx</sub>表示数据收集所需能量消耗。由此可知,数据转发簇头节点需尽可能满足转发数量和传送距离二者均最小要求。设定CH<sub>A</sub>、CH<sub>B</sub>、CH<sub>C</sub>为3个簇头节点,符合以下关系:

$$\begin{cases} A < B < C \\ d_{AB} < d_{AC} < d_{bc} \end{cases} \quad (4)$$

则CH<sub>C</sub>由CH<sub>B</sub>转发数据,CH<sub>B</sub>由CH<sub>A</sub>转发数据。

### 1.3 基于无线传感器网络的园区综合能耗实时监测架构

基于无线传感器网络的园区综合能耗实时监测架构如图3所示。架构内无线传感网络的每个监测子节点均存在一个智能仪表,可独立感知园区中温湿度参数,当接收到监测值指令后进行数据实时感知,计算机可通过无线传感网络接收智能仪表反馈的信息来进行状态监测、统一调度和数据储存等工作<sup>[12]</sup>。园区综合能耗实时监测架构主要由两部分组成:

#### (1) 数据采集前端

将ZigBee无线传感网络作为数据采集前端。网络数据采集和集成需要通过网络主节点完成,且由节点构成树状网,同时主节点也是网络的网关。对信息进行中转、传输、批准网络中融入其他节点等工作由网络的中转节点负责。通过RS485将ZigBee网络中子节点和园区网络内能耗计量仪表相连,使子节点具有通过485接口收集能耗数据、感知园区温湿度信息等功能。在树状形式的分层ZigBee无线传感网络内,园区能耗采集器中的ZigBee子节点向主节点或中转节点传送信息需要路由协议进行定时传送<sup>[13]</sup>。主节点将综合能耗数据包输送给检测中心需要由RS232向上位机实行串口通信实现。

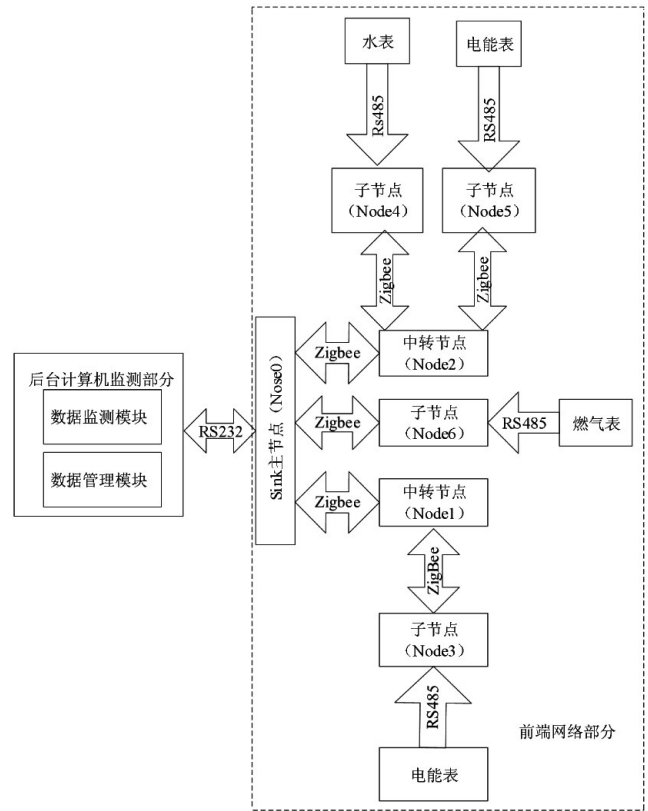


图3 园区综合能耗监测架构

#### (2) 后台计算机监测部分

1) 数据监测模块:设定COM端口,对ZigBee网络汇总来的数据信息进行预处理,消除不同来源数据属性之间的差异,并通过决策树实现异常能耗数据的监测,并保存能耗监测结果至数据库中。

2) 数据管理模块:为用户提供浏览、搜索功能,并通过可视化界面呈现园区能耗的监测结果,例如园区水电耗量的实时情况和历史曲线等。

综上所述,遍布在传感器网络内的主节点将传感器子节点的数据采集和集成后利用串口向上位机传输。无线传感网络内充当上位机和传感器节点之间的网关的是ZigBee主节点。监测中心与主节点衔接运用串口通信方式,运用ZigBee技术完成主节点和传感器子节点支点的无线信息交换;掌管园区监测区域信息采集和处理并上传给主节点的是附带射频收发器的无线传感器子节点<sup>[14]</sup>。

监测计算机是客户机和服务器综合体,随时对园区传感器网络的数据进行收集、保存、监督和管理,在对收集数据进行网络传输的同时可以设置超限报警等参数;相关信息的获得是利用ZigBee无线网络技术和串口通信技术实现,最终达到园区综合能耗实时监测、结果呈现以及后台综合管理目的。

### 1.4 基于决策树的园区异常能耗数据监测

#### 1.4.1 能耗数据预处理

通过无线传感网络传输数据的预处理,提高数据质

量,确保综合能耗监测效果。因不同来源数据属性各异,无法实行度量分析,会致使能耗监测结果不精准。为此需将数据之间的属性通过属性选取进行预处理,处理方式如下:

设用  $S=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  描述无线传感网络采集数据,  $m_j, s_j$  分别表示数据位于第  $j$  个属性上的平均值和标准偏差的计算结果,具体表达式为:

$$m_j = \{x_{1j} + x_{2j} + \dots + x_{nj}\} \quad (5)$$

$$s_j = \frac{[(x_{1j} - m_j)^2 + (x_{2j} - m_j)^2 + \dots + (x_{nj} - m_j)^2]^{\frac{1}{2}}}{n-1} \quad (6)$$

数据样本位于第  $j$  个属性取值结果  $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}$  的标准化处理结果为:

$$z_{ij} = \frac{(x_{ij} - m_j)}{s_j} \quad (7)$$

### 1.4.2 异常能耗监测实现

采用决策树监测园区异常能耗数据,决策树包含根、内部、叶子三个节点以及与其相连的有向边,其树状结构可依据特征属性的分类结果划分样本数据<sup>[15]</sup>,决策树简易示意图由图4表示。

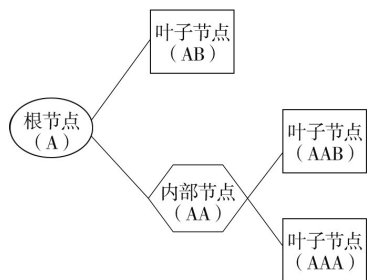


图4 决策树简易示意图

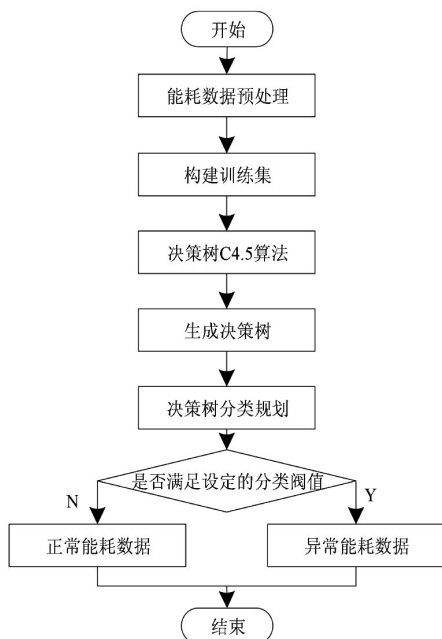


图5 决策树实行园区综合能耗实时监测流程

依据上述决策树实行园区综合能耗实时监测,如图5所示。

由图5可知,实时监测时先对能耗数据进行预处理,利用预处理后的数据构建训练集,采用决策树C4.5算法生成决策树,并依据决策树对训练集进行分类划分,分析分类结果是否满足设定的分类阈值,实则说明是该数据为异常能耗数据,否则是正常能耗数据。通过上述过程实现园区综合能耗数据的实时监测。

## 2 实验分析

实验选取某园区为实验对象,该园区总建筑面积约为110万平方米,建筑数量有190栋,园区内总人数约为36500人。将本文方法应用至该园区进行能耗监测,从无线传感网络传输性能、能耗监测性能以及监测结果的可视化显示三个方面验证本文方法能耗监测效果。

### 2.1 无线传感网络传输性能

为验证本文方法应用的无线传感网络传输性能,选取OSPF、LEACH、RIP三种协议与本文无线传感网络应用的S-LEACH进行能源数据传输有效性对比,统计存活节点数与运行时间以及数据总量的关系,结果见图6、图7。

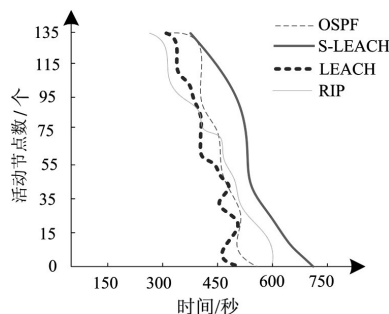


图6 存活节点数与运行时间的关系

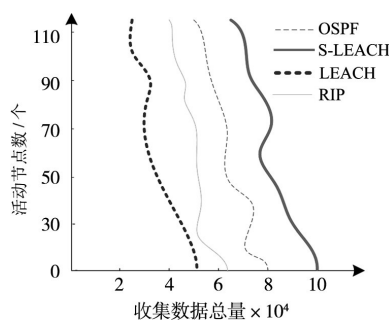


图7 存活节点数与数据总量的关系

无线传感网络路由设计中的重要因素是将能源有效性最小化,图6展现了在各自网络生命周期中四种协议在网络内,当前存活节点数和网络运行时间的关系,可看出S-LEACH存活节点数比其余三种协议存活率高,S-LEACH在活动节点数为0的存活时间分别比LEACH、OSPF、RIP延迟约200、150、100s。原因在于本文应用的S-LEACH

传输协议采用多跳转形式进行簇间传输,可有效节省传输能耗,提升活动节点存活时间。

图7展示了Sink节点接收数据总量的递增,网络内存活节点数的变化,可以见到S-LEACH在第一个节点死亡时收集数据总量远远高于其他三种,当网络内的死亡节点数相同时S-LEACH内的Sink节点收集数据总量依旧高于其他协议。

综上可得出结论:在园区综合能耗实时监测中选用S-LEACH作为无线传感网络传输机制可降低数据传输能耗,提升网络生命周期。

### 2.2 园区建筑能耗监测

为验证本文方法可更好进行园区能耗监测,选取实验对象中某栋建筑进行用电分析,该建筑面积约为37 600 m<sup>2</sup>,人数约为3 160人,统计本文方法监测该建筑动力用电、空调用电、照明插座用电三种用电分项的能耗数值结果如图8、图9所示。

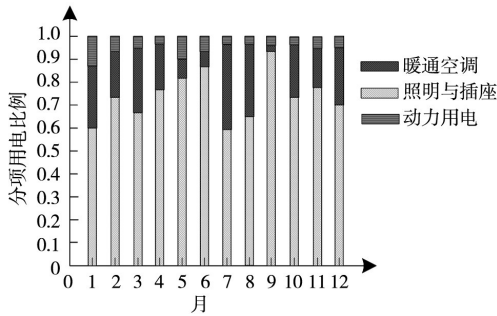


图8 建筑逐月分项用电总量指标

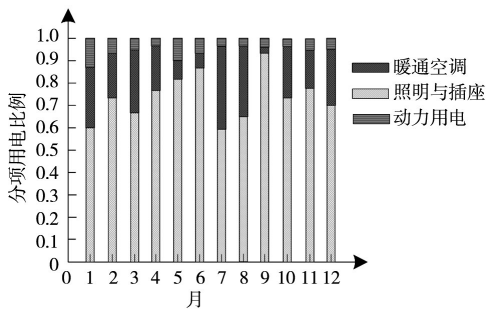


图9 建筑逐月分项用电比例指标

通过图8和图9可知,本文方法监测得出:暖通空调用电量受室外环境影响,随季节更替变化,动力用电量和照明插座用电量各月份差异不大,照明插座用电量平均约为12.3万kWh/月,占总用电量比例因季节变化有所不同,过渡季最大约91%,制冷季约为51%,供暖季约为78%。动力用电量平均约为0.9万kWh/月,占总用电量比例约4.8%。季节不同暖通空调用电量不同,供冷季平均为9万kWh/月,占用电量总比例约46%,大多用于运行冷源设备、空气处理机组和空调末端等设备,供暖季平均约为2.9万kWh/月,占用电量总比例约19.7%,主要用于运行热水循环泵。综上分析可知,本文方法可有效监

测园区建筑能耗数据,用于精准分析建筑具体的分项的用电消耗情况。

### 2.3 园区能耗实时监测灵敏度

园区综合能耗实时监测的目的是能及时发现异常的能源消耗,方便及时解析并对其进行相应处理措施,在此过程中能耗实时监测的灵敏度是能耗监测的重中之重。为此选取文献[4]方法(BIM模型监测方法)和文献[5]方法(BLE和Wi-Fi监测方法)为本文方法的对比,统计三种方法的能耗监测灵敏度结果如表1所示。

表1 能耗实时监测灵敏度

异常能耗数据/条	监测时间/s		
	文献[4]方法	文献[5]方法	本文方法
375	23.5	37.4	10.4
486	37.6	44.6	22.5
549	44.9	52.7	34.5
742	59.8	66.9	44.7
1 144	91.2	100.8	86.3
1 258	110.7	123.5	97.6
1 354	125.6	137.8	106.3

由表1可知,纵向可知,随着异常能耗数据规模增加,三种方法监测花费时间同样递增式增长,横向可知,同等数量异常能耗数据下,本文方法实时监测灵敏度最高,查询异常能耗数据耗时最短。

### 2.4 能耗监测可视化呈现

#### 2.4.1 历史曲线

实验给出的本文方法监测到的园区水能消耗情况历史曲线,如图10所示。



图10 水能消耗历史曲线

由图10可知,本文方法监测出该园区2020年1月至6月水能消耗情况,能够明显看出水能消耗整体呈下降趋势,1月至3月是平缓下降,由685吨左右下降至534吨左右,3月至6月是急促下降,由534吨左右下降至124吨左右,2012年1月到6月整体下降了561吨左右,水能消耗下降显著,充分说明本文方法可通过图像形式可视化呈现园区能耗数据,便于园区能耗数据分析。

#### 2.4.2 历史数据

实验给出的本文方法监测到的园区用电历史数据,

(下转第179页)