

中图分类号: F272  
学科分类号: 120100

论文编号: 1028709 20-S036

# 硕士学位论文

## 我国光伏组件报废量预测及回收网络 规划研究

研究生姓名	傅丽芝
学科、专业	管理科学与工程
研究方向	物流与供应链管理
指导教师	张 钦 教授

南京航空航天大学

研究生院 经济与管理学院

二〇二〇年四月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Economics and Management

# **Research on Forecasting and Recycling Network Planning of PV Modules Waste in China**

A Thesis in

Management Science and Engineering

by

Fu Li Zhi

Advised by

Prof. Zhang Qin

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Management

April, 2020



## 摘 要

在政策与市场双重作用下,我国光伏行业迅速发展,新增装机容量连续五年位列全球第一。光伏发电虽然取之不尽、安全无污染,但退役的光伏产品会对环境造成极大的污染,当 25 年或 30 年寿命到期后,我国将面临大规模的组件退役问题,若处理不好组件报废问题,将会造成资源的极大浪费和环境污染问题,甚至是经济与社会问题。而要合理回收处理报废光伏组件,科学规划有效的报废组件回收网络系统至关重要。

由于目前尚未出现大规模的组件报废,导致针对报废光伏组件的相关研究几乎空白,而要科学合理的规划逆向物流回收网络,就要充分考虑光伏产品不同于传统电子废弃物,如手机、家用电器等特点,建立适用于光伏行业的逆向回收网络系统。因此本文将光伏组件作为研究对象,对其逆向回收网络系统规划问题进行研究,具体工作内容如下:

首先,报废光伏组件的回收渠道、拆解处理企业的选址和规模要受到组件报废量的极大影响,因此,对光伏产品废弃物的回收处理,必须将报废量的预测作为逆向物流系统设计的第一个步骤。本文考虑了组件质量不同,将组件寿命分为四种退化情景,采用威布尔分布模型来分析光伏组件使用寿命分布情况,并采用灰色预测模型以及 BP 神经网络模型对未来我国光伏装机情况进行预测,在此基础上,构建市场供给 A 模型来预测我国未来光伏组件报废量及其组成材料废物量。

其次,光伏组件不同于手机、家用电器等传统电废物,光伏发电用户分为了集中式光伏与分布式光伏两种,前者报废集中,易于集中回收,而后者报废分散,不易回收,但两种用户都无法自行对光伏组件进行拆解,因此本文将两种客户群体以及拆解难的特点考虑到回收网络规划中去,建立包括客户区、回收中心、拆解处理中心、再制造中心以及填埋场在内的四层回收网络系统。以逆向物流回收总成本最小化为目标函数,建立混合整数规划模型(Mixed Integer Linear Program, MILP)来设计报废组件回收网络,借助 Lingo 软件求解最优解,从而确定网络中的设施选址和各个节点的流量分配情况。

最后,以江苏省为应用研究对象,对江苏省报废光伏组件回收网络进行规划设计,确定网络选址及流量分配,验证 MILP 模型的有效性,并希望为其他城市建立报废组件回收网络提供参考。

**关键词:** 报废光伏组件; 预测; 威布尔分布; 神经网络; 回收网络

## ABSTRACT

Under the dual role of policy and market, China's photovoltaic power generation has developed rapidly, and the newly installed capacity has ranked first in the world for five consecutive years. Although photovoltaic power generation is inexhaustible, safe and pollution-free, retired photovoltaic products will cause great pollution to the environment. When the life span of 25 or 30 years expires, China will face large-scale modules decommissioning problems. If the problem of component scrap is not handled properly, it will cause great waste of resources and environmental pollution problems, even economic and social problems. To properly recycle and dispose of scrap PV modules, it is important to scientifically plan an effective scrapped component recycling network system.

Since large-scale component scrapping has not yet occurred, the related research on scrapped PV modules is almost blank. To scientifically and rationally plan the reverse logistics recycling network, it is necessary to fully consider that photovoltaic products are different from traditional electronic wastes, such as mobile phones and household appliances, and establish a reverse recycling network system for the photovoltaic industry. Therefore, this paper takes PV modules as research objects and studies the planning of reverse recovery network system. The specific contents are as follows:

First of all, the location and scale of the recycling channels and dismantling enterprises of scrapped PV modules will be greatly affected by the amount of scrapped components. Therefore, the prediction of scrap quantity must be taken as the first step in the design of reverse logistics system for waste recovery and treatment of photovoltaic products. This paper considers the different component quality, divides the component life into four kinds of degradation scenarios. The life distribution of photovoltaic modules is analyzed by weibuling distribution model, and the grey prediction model and BP neural network model are used to predict the future installed photovoltaic installations in China. On this basis, the market supply A model is constructed to predict the future scrap quantity of PV modules and the amount of material waste in China.

Secondly, PV modules are different from traditional electric wastes such as mobile phones and household appliances. Photovoltaic power generation users are divided into centralized photovoltaics and distributed photovoltaics. The former is centralized and easy to collect, while the latter is scrapped and scattered, and it is not easy to recycle. However, both users cannot disassemble the PV modules by themselves. Therefore, this paper considers the characteristics of the two customer groups and the difficulty of dismantling into the recycling network plan, and establishes a four-layer recycling network system including the customer area, the recycling center, the disassembly

processing center, the remanufacturing center, and the landfill. Taking the minimum cost of reverse logistics recovery as the objective function, a Mixed Integer Linear Program (MILP) is established to design the scrapped component recycling network, and the optimal solution is solved by Lingo software to determine the location of facilities and the traffic distribution of each node.

Finally, Jiangsu Province is used as an applied research object to design the scrapped PV module recycling network, determine the network location and traffic distribution, verify the validity of the MILP model, and hope to provide reference for other cities to establish a scrapped component recycling network.

**Keywords:** Scrapped photovoltaic modules, Prediction, Weibull distribution, Neural network, Recycling network

## 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	4
1.2 国内外研究现状分析.....	4
1.2.1 报废量预测研究现状.....	4
1.2.2 逆向物流回收网络规划研究现状.....	7
1.2.3 目前研究存在的不足.....	9
1.3 研究目标 .....	9
1.4 研究内容 .....	10
1.5 研究方法与技术路线.....	11
1.6 研究创新点 .....	12
第二章 我国报废组件回收处理现状.....	14
2.1 报废光伏组件逆向物流回收系统.....	14
2.1.1 报废组件市场.....	14
2.1.2 报废组件逆向物流回收系统.....	14
2.2 报废光伏组件回收处理技术.....	15
2.3 报废光伏组件回收相关政策.....	18
2.3.1 我国报废组件回收的相关做法.....	18
2.3.2 国际上报废组件回收的相关做法.....	19
2.3.3 我国报废组件回收处理存在的问题.....	20
2.4 本章小结 .....	21
第三章 我国光伏组件报废量预测.....	22
3.1 光伏组件报废量预测模型.....	22
3.1.1 光伏装机容量预测模型.....	22
3.1.2 光伏组件使用寿命分布模型.....	30
3.1.3 光伏组件组成材料废弃量预测模型.....	33
3.2 报废量预测结果分析.....	35
3.2.1 光伏组件报废量预测.....	35

3.2.2 光伏组件组成材料报废量预测.....	36
3.3 本章小结 .....	38
第四章 废弃光伏组件回收网络规划模型.....	39
4.1 报废光伏组件回收网络结构.....	39
4.2 回收网络模型建立.....	40
4.2.1 问题描述.....	40
4.2.2 模型假设与符号说明.....	40
4.2.3 模型建立.....	43
4.3 本章小结 .....	44
第五章 报废光伏组件回收网络规划应用研究.....	45
5.1 回收网络节点分布.....	45
5.2 基本数据 .....	47
5.3 回收网络设计方案.....	52
5.4 敏感性分析 .....	55
5.4.1 不同成本下的结果分析.....	55
5.4.2 各设施不同处理能力下的结果分析.....	59
5.4 本章小结 .....	63
第六章 结论与展望 .....	64
参考文献 .....	65
致 谢 .....	71
在学期间的研究成果及发表的学术论文.....	72
附 录 .....	73



## 图表清单

图 1.1	技术路线.....	12
图 2.1	2000-2018 年我国光伏装机容量 .....	14
图 2.2	报废组件逆向物流回收系统.....	15
图 2.3	光伏组件技术分类.....	16
图 2.4	光伏组件生命周期.....	17
图 2.5	报废光伏组件回收处理技术路径.....	18
图 3.1	三层 BP 神经网络.....	26
图 3.2	BP 神经网络计算过程.....	27
图 3.3	三种方法预测结果曲线图.....	29
图 3.4	2019-2050 年我国光伏装机容量预测 .....	30
图 3.5	光伏组件退化概率密度分布函数.....	32
图 3.6	光伏组件各组成材料报废量占比情况.....	38
图 4.1	报废光伏组件逆向物流回收网络结构.....	39
图 5.1	2008-2018 年江苏省光伏装机容量 .....	48
表 1.1	不同电压等级的光伏电站占地面积.....	1
表 1.2	光伏组件组成成分回收潜在价值.....	2
表 1.3	不同预测方法优缺点与适用性比较.....	6
表 3.1	GM(1,1)模型预测结果.....	24
表 3.2	Verhulst 模型预测结果 .....	25
表 3.3	BP 神经网络模型预测结果.....	28
表 3.4	三种方法预测结果对比.....	29
表 3.5	光伏组件退化的威布尔分布参数.....	32
表 3.6	不同组件技术市场占比情况.....	33
表 3.7	光伏组件各组成部分的重量情况 (kg/m <sup>2</sup> ) .....	34
表 3.8	光伏组件规格.....	35
表 3.9	我国光伏组件年报废量的预测结果 (GW) .....	36
表 3.10	光伏组件组成材料年报废量预测 (万吨) .....	37
表 5.1	江苏省再制造中心候选企业.....	46
		VII

表 5.2	江苏省有经营许可的填埋处置企业汇总 .....	47
表 5.3	江苏省各城市人口分布 .....	48
表 5.4	2020-2035 年江苏省各客户区报废量预测量 (MW) .....	48
表 5.5	客户中心到回收中心的运输距离 (km) .....	49
表 5.6	回收中心到拆解处理中心的运输距离 (km) .....	49
表 5.7	拆解处理中心到再制造中心的运输距离 (km) .....	50
表 5.8	回收中心、拆解处理中心到填埋场的运输距离 (km) .....	50
表 5.9	光伏组件单位运输价格 (元/t·km) .....	51
表 5.10	各节点固定投资成本、处理能力及单位处理成本 .....	51
表 5.11	客户区到回收中心的流量分配方案 (单位: t) .....	53
表 5.12	回收中心到拆解处理中心的流量分配方案 (单位: t) .....	53
表 5.13	拆解处理中心到再制造中心的流量分配方案 (单位: t) .....	54
表 5.14	回收中心到填埋场的流量分配方案 (单位: t) .....	54
表 5.15	拆解处理中心到填埋场的流量分配方案 (单位: t) .....	55
表 5.16	回收中心与拆解处理中心固定投资成本分布 (万元) .....	56
表 5.17	不同固定投资成本下的回收网络结果 .....	56
表 5.18	不同单位现场拆卸成本下的回收网络结果 .....	56
表 5.19	回收中心不同单位处理成本下的回收网络结果 .....	57
表 5.20	拆解处理中心不同单位处理成本下的回收网络结果 .....	57
表 5.21	不同单位运输成本下的回收网络结果 .....	58
表 5.22	回收中心不同处理能力下的回收网络结果 .....	59
表 5.23	拆解处理中心不同处理能力下回收网络结果 .....	61
表 5.24	报废组件回收网络优化策略 .....	62

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

#### 1.1.1 研究背景

##### 1. 废弃光伏组件的回收利用

近年来,在光伏扶持政策推广的背景下,到 2015 年底,我国光伏累计装机容量达到 43GW,成为全球累计装机量最大的国家。截至 2018 年底,我国的光伏新增装机量达到 44.26GW,虽然相比于 2017 年有略微下降,但是仍占据全球第一的位置,累计装机已经达到了 174GW<sup>[1]</sup>。与此同时,我们要警觉的是,当光伏电站服务期达到 25 或 30 年时,大批量的报废光伏产品将成为重点关注的问题,对报废光伏组件的回收处理问题迫在眉睫<sup>[2]</sup>。

从光伏发电系统的构成来看,主要包括支架、逆变器、组件、蓄电池、汇流箱以及其他各种零件和设备等,而对于报废的光伏产品而言,后续的回收价值主要体现在光伏组件上,报废组件中含有大量有价值且可再利用的稀有金属材料,以及会对环境造成二次污染的有毒有害物质。根据相关预测,到 2025 年,光伏组件的报废量有望达到  $2.5 \times 10^4$ t,而截止 2035 年,将达到  $1.2 \times 10^6$ t,其中晶硅组件是主要废弃种类,2025 年到 2035 年间,其废弃量将从  $1.9 \times 10^4$ t 增加到  $1.1 \times 10^6$ t,增长约 58 倍<sup>[3]</sup>。由此可以看出,2025 年后报废光伏组件的回收将会成为一个新兴市场,对报废光伏组件的回收很有必要。

(1) 废旧光伏组件限制土地资源再利用。中国投资协会王淑娟对不同电压等级下的光伏电站占地面积进行了总结,如表 1.1<sup>[4]</sup>所示。光伏组件在安装过程中,主要以水泥支架作为支撑,因此当组件报废时,安装遗留下的混凝土结构将难以处理,会形成大面积的混凝土桩林,而光伏电站占地面积大,如不好好处理,将大大限制土地资源的再利用。

表 1.1 不同电压等级的光伏电站占地面积

并网电压等级 (KW)	10	66	110	220	330
占地面积 (m <sup>2</sup> )	1000	10000	15000	20000	30000

(2) 环境影响。2018 年我国光伏累积装机容量超过 174GW,若以一块 250W、重达 19kg 的光伏组件计算,174GW 将产生  $1.3 \times 10^7$ t 的废弃物<sup>[5]</sup>,光伏组件达到寿命年限后如果不妥善回收处理,将给环境带来巨大的污染。

(3) 资源需求。光伏组件主要由玻璃、铝边框、层压件、电池片、EVA 膜、接线盒、光伏背板等组成,其组成材料主要包括玻璃(70%)、铝(10%)、密封胶(10%)、硅(5%),银、铜、镓等稀有金属(约占 1%)<sup>[6]</sup>,而这些材料大多可以循环再利用,未来光伏组件材料最大

的供应来源将不再是矿山而是来自于光伏组件自身的循环再利用，具体光伏组成成分的回收价值如表 1.2 所示<sup>[7]</sup>。

表 1.2 光伏组件组成成分回收潜在价值

材料	单耗 (g/w)	每 GW 组件含量 (t)	每 GW 可回收量 (t)
玻璃	51	50509.8	37882.4
铝边框	10	9803.9	8823.5
EVA	2.625	2625.1	525
焊带	0.897	896.9	717.5
背板	1.32	1264.5	1011.6
接线盒	0.002	1950	1560
正银	0.023	25	18.8
背银	0.008	8.2	4.1
背铝	0.306	305.9	244.7
硅	2.118	2117.6	1376.4
总计		69506.9	52164

(4) 显著的经济与社会价值。相关研究表明，2025 年每瓦的组件回收价值能够达到 0.58 美元，而到 2035 年，每瓦回收价值将达到 1.21 美元，根据预测，到 2035 年全球报废组件将达到 17GW，若能够 100% 全部回收，回收价值将达到约 21 亿美元<sup>[8]</sup>。

(5) 提供就业机会。未来到 2025 年后，我国光伏组件将出现大批量的报废，组件的回收处理将成为一个新兴市场，这将为社会带来大量的就业机会。

## 2. 国外光伏组件废弃物回收处理现状

目前国际上已经开始对光伏产品进行回收，2007 年 7 月，PV CYCLE 组织应运而生，其由国际上光伏制造商自发建立，致力于对报废组件的回收和再利用，目前会员数占欧洲市场的 90% 以上，截至 2015 年年底，PV Cycle 回收量达到约 2100 万个透明玻璃瓶、1.02 亿个铝罐以及其他更多的产品和材料，从 2010 年运营开始，其回收活动减少大约 12800t 二氧化碳排放量，预计到 2035 年，协会在全球的组件回收价值将达到 120 亿美元<sup>[9]</sup>。2012 年，欧盟报废电子电气设备 (WEEE) 指令第一次将组件纳入回收范围，规定将报废组件（无论当前或历史安装的）与家用电器归为一类来进行强制回收处理，根据指令，对于 2019 年以前使用过的光伏组件集中回收率必须达到 85% 以上，材料的再循环利用率必须达到 80% 以上<sup>[10]</sup>。2014 年 10 月，在 IECTC82WG2 的会议上，一部分 WG2 成员也提议将“光伏组件的回收与环境安全评估”作为新的工作组项目提案 (NWIP) 展开了讨论，未来制订出组件回收以及环境安全评估的 IEC 标准<sup>[11]</sup>。2018 年 7 月 17 日，法国威立雅与欧洲光伏组件回收组织 PV CYCLE、法国可再生能源工会合作，欧洲首座太阳能电池板回收工厂正式投入运营，该工厂将在 2018 年回收 1300t 太阳

能板，并设立了 2022 年回收 4000t 的目标（约 100MW），其回收利用率已到达 95%<sup>[12]</sup>。

### 3. 我国光伏组件废弃物回收处理现状

国际上发达国家已经做出了一些针对光伏组件废弃物的政策法规以及应对措施，而我国也针对废弃组件做了相应的措施。在国家层面上，“十二五”期间，国家科技部开展了 863 课题“大型光伏系统设计集成技术研究示范及装备研制”，其中包括了对“光伏组件的无害化处理和回收利用”，该课题包括“回收与无害化处理国际经验与可行性分析”与“回收与无害化处理技术和实质性分析”两大研究，其从技术角度，分析总结废弃组件回收与无害化处理存在的技术路线以及量化晶硅组件中的可回收材料。在企业层面上，天合、英利等大型光伏企业对废弃光伏组件存在自己的回收处理技术，如天合通过对报废组件进行物理拆解，回收废弃组件中的硅、银、铝等有价值材质材料，其在含氟背板无害化处理中取得了一定的进展，提出电池片中硅料回收至少做到 4N 级别以上，银达到 2N 级别。虽然国家以及相关企业都对废弃组件有所关注，但多为处理技术方面的研究，没有形成产业化规模，在政策法规方面的制定还是空白，企业也缺乏从管理层次上对废弃组件进行回收研究。

由于我国还未出现大规模的报废组件，政府和企业对组件的回收研究还处在摸索阶段，回收的制度化环境也未完善，导致我国废弃光伏组件无法形成健康有序的回收市场。目前市场上的存在的回收多为小作坊式或者不规范的零散企业回收，回收市场混乱无序，其中作坊式与零散企业由于技术受限，无法有效提纯电池片中有价值材料和贵金属，造成资源的极大浪费，同时由于不规范的操作，也会对环境造成巨大的负担，而应该在回收产业中发挥作用的组件生产商却游离于产业之外，没有建立高效有序的组织回收网络。当未来光伏组件大规模报废时，废弃组件如何回收处理将成为我们要解决的首要问题，而要实现废弃光伏组件的回收再利用首先要建立一个合理的报废光伏组件回收网络，这也是我国政府和光伏组件利益相关企业必须要解决的问题。

基于上述光伏组件回收的研究背景，即将产生的大量报废光伏组件急需政府和企业建立有效的回收网络，而我国光伏组件回收才刚刚起步，回收意识薄弱，不仅企业没有实施有效回收，学术界也缺乏有关光伏组件回收网络的研究，因此需要借鉴电废物或其他相似属性行业的相关研究。光伏组件回收网络的规划又与报废量息息相关，因此本文首先对废弃光伏组件废弃量进行预测，同时考虑到光伏系统直接长期暴露于外部空气中工作且属于“高技术门槛”行业，光伏组件的使用寿命可能远远达不到理想寿命 25~30 年，因此首先要对光伏组件的寿命分布进行分析，根据组件不同寿命年限的概率分布来预测出光伏组件的报废量；其次依据光伏发电系统的不同（集中式与分布式发电）以及用户无法自行拆解这些特征，来分析适用于光伏行业的回收网络。本研究建立的光伏回收网络是包含分布式客户区和集中式、回收中心、拆解中心、再制造中心以及填埋场四层在内的报废组件回收网络，同时立足江苏，对江苏报废光伏组件回收

网络规划进行应用研究,希望对其他城市构建报废光伏组件回收网络具有一定的指导作用。

### 1.1.2 研究意义

太阳能光伏行业近年来发展迅猛,国家能源局也制定出 2020 年光伏发电要占到可再生能源的 15%,2030 年占到可再生能源的 30%,2050 年将占到可再生能源的 50%的目标,光伏发电的爆发式增长使得企业不得不面临回收大量报废组件的问题,随着时间的推移必定会有大量光伏组件报废,废弃组件的回收和资源化利用已经受到国际社会的密切关注。加强对废弃组件回收问题的研究,具有重要的意义。

#### 1. 理论意义

(1) 在组件报废量预测方面。本研究在分析光伏组件使用寿命分布的基础上,将光伏组件按照不同质量分成两阶段,考虑四种退化情景预测组件报废量,这在光伏行业中几乎空白,具有理论参考价值。一是在我国光伏行业尚未用预测方法对组件报废量进行预测;二是前人对组件报废量预测多是采用线性预测,即组件寿命固定不变,而光伏组件使用寿命会受产品质量因素、环境因素以及运维管理因素等的影响,而产生变化,因此考虑组件使用寿命变化,划分四种退化情景预测报废量,对后续研究具有理论借鉴意义。

(2) 在报废组件回收网络规划方面。此前研究中,大多研究的是光伏组件的回收处理技术以及生命周期评价问题,而尚未有回收网络规划的研究。同时光伏行业区别于手机、汽车等行业,其用户群体分为大型地面集中式光伏发电系统和户用分布式光伏发电系统,前者占地面积大,报废地较为集中,后者报废情况类似于手机、家电等行业,报废分散,不易回收,且两种报废群体都具有拆解难、用户无法自行拆解送入回收点的特点,因此本研究在建立回收网络时同时将不同的客户群体和需要专业的拆解企业进行拆解考虑到回收网络规划中,具有理论创新价值。

#### 2. 实践意义

光伏发电行业发展迅猛,正处于行业上升阶段,而组件使用寿命较长,政府、企业和用户群体回收意识薄弱,当出现大规模组件报废时,缺乏相应的应对措施。本研究通过对我国光伏组件废弃量进行较为准确的预测,帮助政府、企业和用户群体认识到建立光伏组件回收网络系统的严峻性以及紧迫性,并针对光伏发电系统特性来建立报废组件回收网络,为相关责任主体回收决策计划提供了依据,对我国光伏行业的长远发展具有实际应用价值。

## 1.2 国内外研究现状分析

### 1.2.1 报废量预测研究现状

#### 1. 传统行业报废量预测研究现状

报废量预测的方法很多,大致可以归纳为以下几种:(1)判断分析法,利用有关专家和预测人员的相关经验对未来的数据进行预测;(2)时间序列法,即利用历史的资料数据来预测数据,也称为外推法;(3)因果分析法,即分析影响数据变化的因素,找出预测数据和变量之间的相互关系,如回归分析法等;(4)组合法,即对单个预测对象建立多个预测模型,并对每个模型进行分析加以不同的权重从而进行数据的预测<sup>[13]</sup>。由于我国光伏行业刚起步时间不久,对光伏组件回收研究更少,还没有有关光伏组件废弃量的研究,而电子电器废弃物产品与光伏组件废弃物属性类似,光伏产品正面临着行业快速上升阶段,意味着产品的更新换代速度快,废弃回收问题也亟需解决,因此本研究重点借鉴了国内外学者对于电子电器报废量预测的研究。

2001年,Simon W等<sup>[14]</sup>将预测电子电器产品报废量的统计工作作为管理电子电器废弃物的首要步骤,并总结了市场供给模型、市场供给A模型、斯坦福模型、时间梯度模型、卡内基梅隆模型、“估计”模型和ICER模型(增量成本效益比模型)这7种估算模型。2005年,刘小丽等<sup>[15]</sup>人在分析了电子废物类型及其可能造成的主要环境问题的基础上,用斯坦福模型估算了我国2000-2010年间“四机一脑”产品的废弃量。2009年,梁晓辉等<sup>[16]</sup>利用“四机一脑”的销售量及其在废弃阶段不同处理处置方式的比例等信息,使用卡内基梅隆模型对这五种电子产品的废弃量、再使用量、循环量和填埋量分别进行了预测。2010年,Yu J等<sup>[17]</sup>参考斯坦福模型,结合不同的影响因素如报废年限、产品市场占有率等,估算出电冰箱、电视机、洗衣机、空调、电脑五大类家电(简称“四机一脑”)的未来报废量及其增长趋势。李海红等<sup>[18]</sup>认为经济发展水平、燃气情况和垃圾回收利用率等因素对农村人均生活垃圾产生量产生影响,并采用多元线性回归模型来预测农村生活垃圾的产量。Yang Yang等<sup>[19]</sup>使用时间序列方法对电子废弃物资源潜力进行预测。2011年,李劲等<sup>[20]</sup>使用系统动力学方法预测电子产品废弃量,并引入产品使用寿命及成长极限的概念,以时间动态方式预测未来20年洗衣机的废弃量。2013年,JIEXIAN HE<sup>[21]</sup>结合家电寿命分布,利用斯坦福模型和市场供给模型,预测2012—2020年家电废弃物产生量,然后对废旧家电的主要材料进行了回收利用估算。2014年,Qi-yun LIAO等<sup>[22]</sup>以城市重庆为例,采用灰色模型GM(1,1)对重庆未来四年的建筑垃圾产生量进行了预测。2016年,刘志峰等<sup>[23]</sup>结合Gompertz模型和保有量系数法,预测了全国31个省2003-2020年“四机一脑”的报废量,并对5种家用电器报废总量构成、时间及空间分布进行分析。宋广翰等<sup>[24]</sup>利用市场供给A模型估算了我国2015-2024年打印机的报废量,并分析了其资源利用价值和产生的环境危害性。

2005年开始,组合模型也成为废弃物产生量预测研究的趋势。对组合模型的研究主要分为两类,一类是将多种模型进行简单的加权组合,以权重系数为主要研究问题。Zheng Liu<sup>[25]</sup>基于对数拟合、线性拟合、指数平滑和灰色预测GM(1,1)提出了组合的权重变化模型,并根据厦门市2009年至2014年的住宅固体废物数量确定了组合权重变化模型的最优权重,并预测了

2015 年至 2024 年的产量, 结果表明, 组合权重变化模型在预测精度方面表现良好。另一类是采用某一种方法建立模型, 采取另一种方法对模型参数进行预测。王文梅等<sup>[26]</sup>采用灰色关联度分析确定影响生活垃圾产生量的主要因素, 通过分析影响因素建立等维灰数递补模型进行预测, 在此基础上建立多种影响因素的线性回归模型, 对未来几年的城市生活垃圾产生量进行预测。

总的来看, 电废物报废量的预测方法主要可以分为: 市场供给模型、市场供给 A 模型、斯坦福模型、时间梯度模型、卡内基 梅隆模型、“估计”模型和 ICER 模型、灰色预测模型共八种类型, 各种方法在应用过程中针对不同的研究对象的特点如表 1.3 所述<sup>[27, 28]</sup>。

表 1.3 不同预测方法优缺点与适用性比较

预测方法	特点	适用对象
市场供给模型	将销售数据与平均寿命作为根据, 计算简单	更新换代速度稳定, 平均寿命变化小的产品
市场供给 A 模型	市场供给模型的改进, 考虑不同寿命的分布值	
斯坦福模型	对市场供给 A 模型的改进, 考虑了产品寿命分布随时间的变换	更新换代速度稳定, 平均寿命变化小的产品, 但需要进行深入的市场调查来确定产品废弃概率
卡内基 梅隆模型	对市场供给方法进行修正, 考虑了电废物报废后的处置方式与再利用方式	适用于考虑废弃物处置方式与再利用方式情况
时间梯度模型		
“估计”模型	需要长期连续数据作为预测的支撑	淘汰速度较慢, 且需要长期连续数据作为预测支撑
ICER 模型		
灰色预测模型	对于不确定因素的复杂系统预测效果较好, 且所需样本数据较小, 中长期预测精度较差	适用于数据较少、短期预测情况

## 2. 光伏产品报废量预测研究现状

目前, 国内外学者和企业对光伏组件回收的研究主要包括不同组件回收处理技术、回收的生命周期评价等两个方面。发达国家和地区的光伏组件回收处理技术相对于国内发展较早, 已有较大规模的回收联盟企业, 形成较为成熟的产业链, 如 PV CYCLE 等回收组织。光伏组件寿命到期后, 我国虽然拥有巨大的废旧回收利用市场, 但是光伏组件报废数据基本上没有, 目前市场上存在的报废组件回收处理方式大多是大小和规模不一的企业和个体小商贩中, 缺乏专业性与统一性, 而小作坊式的回收处理常出现仅将边框分离卖掉, 其他材料扔掉的现象, 造成了资源的极大浪费, 也导致光伏组件报废量市场基础数据挖掘困难、缺乏行业代表性的问题。然而若光伏组件的报废量无法准确预测, 组件回收处理企业无法准确预知回收成本效益, 从而参与回收的积极性不高, 因此对光伏组件报废量的预测研究对于相关责任主体制定回收决策计划、构建规范有序的回收体系至关重要。

目前国外学者对光伏组件报废量的研究主要考虑光伏组件平均寿命来预测 25 年或者 30 年后的报废量, 如 Annarita Paiano<sup>[29]</sup>根据光伏组件平均寿命 25 年以及组件每 MW 所含的质量,



预测意大利晶硅组件、薄膜组件以及集中器光伏（CPV）和新兴技术光伏在 2012-2038 和 2039-2050 两个时间段各组件报废量的总体情况以及各组件中所含玻璃、EVA、硅和银等贵金属材料的报废量。J.D. Santos 等<sup>[30]</sup>通过威尔分布函数计算安装光伏发电容量的失效概率，并根据累积光伏容量来预测西班牙光伏废物质量。Adriana Dom ínguez 等<sup>[31, 32]</sup>根据 30 年后光伏系统到期分析了光伏组件技术的市场份额、贵金属和关键金属的回收率、变压器的金属成分和薄膜板的开发不同情景下预测墨西哥的光伏废物产生，同时该作者还预测了美国光伏组件和光伏系统的 30 年后废弃物的产生。

综上所述，国内外研究学者预测对象主要为电子电器废弃物、生活垃圾等，对光伏产品废物量的预测很少，主要是考虑组件使用寿命不变来进行线性预测，而在实际情况中，由于组件工作环境的变化、前期安装、运输等因素的影响，组件使用寿命会随之产生变化。另外，通过检索，我们还没有找到关于中国光伏组件报废量预测的文献。因此，本文拟在对光伏组件使用寿命分析的基础上，预测它们的报废量，以便能为政府和相关企业未来对光伏组件废弃物的回收决策提供依据。

### 1.2.2 逆向物流回收网络规划研究现状

通过文献整理分析，发现国内外对逆向物流回收网络规划主要从数学模型优化以及模型目标函数创新两个方面进行研究。

#### 1. 数学模型优化研究

Behnam Vahdani 等<sup>[33]</sup>考虑的回收网络是多级，多设施，多产品和多供应商，并引入区间随机鲁棒优化方法来处理所提出模型中的各种不确定性，提供计算实验以证明所提出的模型在循环网络设计中的适用性。Ramezani 等<sup>[34]</sup>开发了一个多目标不确定条件下的物流网络规划模型，并以利润最大化、响应能力强和供应商有缺陷零件的最小化为三个目标函数。Özkır 和 Başlıgil<sup>[35]</sup>提出了一个模糊多目标优化模型来表达物流网络设计问题，其定义了供应链中与利润最大化、价格调整、需求履行相关的客户满意度的基本目标。Fu Chen 等<sup>[36]</sup>以电动自行车废旧电池为研究对象，立足与中国徐州市，考虑生产者责任，建立应用于废旧电池回收的逆向物流网络系统。Guo 等<sup>[37]</sup>提出了一个多周期的动态联合构建模型来构建逆向物流网络，并采用粒子群算法（PSO）和遗传算法（GA）来验证所提模型的可行性。Kannan Govindan 等<sup>[38]</sup>对 2007 年 1 月到 2013 年 3 月之间发表的 382 篇论文进行综述，发现这些作者的回收网络模型优化大多倾向于非线性规划以及凸优化。Jin Wei<sup>[39]</sup>提出在构建废旧家电网络信息平台的基础上，提出“互联网+回收”的新模式，从而增加了客户与回收企业沟通的信息透明度，减少了回收过程中不确定的特征。徐立伟<sup>[40]</sup>将制造商回收品的库存与回收网络选址进行联合决策，建立了库存-网络选址联合决策模型，从而得出回收网络节点的数量、选址、回收网络节点的存储周期等，实现对回收品库存的

控制。Ene Seval 等<sup>[41]</sup>开发了一个数学规划模型来管理报废车辆回收的逆向物流网络, Shameem 等<sup>[42]</sup>提出一个基于 AHP 和 FEAHP 的集成选择模型, 用以选择废旧汽车逆向物流管理的可持续替代方案。Zheng Zhang 等<sup>[43]</sup>考虑到消费区废旧电子回收量的不确定性和, 拆解中心的回收率, 建立了具有容量约束的单周期废旧电子回收网络的鲁棒优化模型, 以确定设施的数量和位置以及每个设施之间的流量。蒙培富<sup>[44]</sup>考虑汽车零部件的回收需求不确定, 建立汽车零部件逆向物流网络优化模型。王钰雷<sup>[45]</sup>阐述了汽车再制造逆向物流网络的组织模式和运营模式, 通过构造仿真算例, 对构造的优化模型进行验证, 从而证明了模型的有效性。刘艳红<sup>[46]</sup>对北京市废旧汽车逆向物流系统进行了优化分析, 并提出了相对应的解决方案。严南南等<sup>[47]</sup>对基于碳排放约束的废旧汽车逆向物流网络设计问题进行了研究, 设计了网络规划模型, 并通过仿真分析的方式, 验证了模型的有效性。

## 2. 模型目标函数创新研究

Hao Yu 等<sup>[48]</sup>考虑回收成本最小化、环境影响最小化(即碳排放最小化)两个目标函数, 建立包含客户区、回收中心、处理中心(包括再制造和再利用中心、能源回收中心)、二手市场或填埋场为一体的逆向物流回收网络系统。Demirel 等<sup>[49]</sup>提出了一个单一目标的混合整数线性规划, 以最小化二手车反向物流网络的运营成本, 建立反向物流系统的成本包括八个部分, 并且还使用了依赖 GDP 的 Gompertz 函数来预测连续几个时期内二手车的产生量。Alumur 等<sup>[50]</sup>研究了一种用于通用逆向物流系统的多期混合整数规划, 来收集、处理、再制造和回收旧产品。Dat 等<sup>[51]</sup>为 WEEE 的逆向物流网络设计开发了一个单一的目标成本最小化模型。Alshamsi 等<sup>[52]</sup>提出了一种混合整数规划, 用于确定逆向物流系统的设施位置, 产品分配和库存水平。Liu<sup>[53]</sup>研究了一种基于遗传算法的电子商务逆向物流网络设计的单目标数学模型。Yan Li 等<sup>[54]</sup>以中国报废光伏组件为研究对象, 设置包括组件运输成本、固定投资成本、运营成本在内目标函数, 使得成本最小化, 计算得出 2040-2045 年中国面临不同的组件报废量时, 回收中心的选址位置。

Xiaoyong Pan 等<sup>[55]</sup>对电视机、冰箱、空调和洗衣机四种废弃电器建立收集点、回收中心和拆解厂三层废旧家电回收的逆向物流网络模型, 并以最低总成本为目标函数, 其中包括回收成本、运输成本、节点基础设施投资成本、运营成本、政府补贴和可再生资源回收收入。B. Manoj Kumar 等<sup>[56]</sup>以回收卡车轮胎为例, 分析了涉及废旧轮胎的传统逆向物流网络, 重点关注了轮胎的质量特征, 并建议建立一个新的网络, 开发了一个数学模型, 并根据数量优化了成本, 并为参与废旧轮胎回收的逆向物流活动的决策者提供了参考依据。Ali Mirdar Harijani 等<sup>[57]</sup>通过考虑可持续性, 并以预算约束总利润最大化为目标, 为城市固体废弃物建立一个综合的回收和处置网络, 其提出了一种多周期混合整数线性规划模型, 对网络进行优化设计和网络优化运行, 计算得出设施的容量水平和位置、设施中固体废物的分配、设施之间废物的运输以及回收材料的分配有关的决策, 同时该作者还扩展了已开发的社会生命周期评估方法, 以建模网络的社会影响, 并

将该模型与三个模型进行了比较，即没有可持续性的模型、没有预算限制的模型和没有可持续性和预算限制的模型。

综上所述，上述的文献多从传统报废产品角度（如报废汽车、报废手机、报废“四机一脑”等）来优化回收网络模型或开发新的回收网络模型，同时将环境效益最小化、社会效益最大化等因素结合成本或利润目标函数，做回收网络利益权衡成为了研究的热点。但上述文献中很少将报废光伏组件作为研究对象，针对光伏产品的特征进行回收网络规划，因此本文综合考虑上述分析来对报废光伏组件的回收网络规划问题进行深入研究。

### 1.2.3 目前研究存在的不足

在已有的文献中，国内外研究学者对废弃物的预测关注度不断提升，主要的研究行业包括废弃电子电器、废旧衣物、废旧汽车以及近年来兴起的新能源电动汽车废弃动力电池等，但对光伏组件回收网络规划研究以及报废量的预测方面基本上没有，具体问题如下：

#### 1. 报废量预测方法方面。

在预测方法方面。国内外学者已经使用某一种方法或者组合方法对电子电器产品等产品进行废弃物预测，但没有将市场供给 A 模型应用到光伏行业中去；对光伏产品的预测方法只是考虑到组件使用寿命不变来进行线性预测，而在实际情况中，由于组件工作环境的变化、前期安装、运输等因素的影响，组件使用寿命会随之产生变化。

#### 2. 研究对象方面。

在预测和回收网络规划研究对象方面。依据文献发现国内外对光伏组件预测与回收网络规划研究很少，目前国外对光伏产品报废量的预测研究虽然存在，但考虑的因素还不够全面。而我国光伏行业起步较晚，光伏组件报废问题还没有得到广泛关注，也没有产生大面积的组件报废，我国对组件报废量的预测以及回收网络规划方面的研究领域还是一片空白。

#### 3. 研究角度方面。

对废弃物回收网络规划的问题，大多是研究有关手机、“四机一脑”以及汽车等产品，这类报废产品具有报废分散、不易回收的特点，几乎每家每户都会存在报废，而针对报废光伏组件的回收网络规划还处于空白，同时从针对光伏产品特点角度出发的研究几乎空白，因此本研究试图从光伏产品特征角度出发，将光伏具有集中式光伏与分布式光伏以及拆解难的特征考虑到回收网络规划中去，建立适用于报废光伏组件的回收网络系统。

## 1.3 研究目标

- (1) 对中国光伏组件报废量进行较为准确预测，为相关责任主体的回收决策计划提供依据。
- (2) 立足江苏省，建立报废光伏组件回收网络，为其他城市构建回收网络系统提供参考。

## 1.4 研究内容

随着光伏组件的报废，废弃组件的回收将成为亟需解决的问题。而目前我国还没有建立有效的回收网络，而回收网络的建设，即回收渠道、处理工厂等所建立的位置和规模会受到组件报废量的极大影响，因此必须将报废量的预测作为逆向物流回收网络设计的第一个步骤。同时，在回收网络设计过程中，本文充分考虑到光伏组件不同于传统电废物的特点，建立符合报废组件的回收网络，具体的研究内容如下：

### 1. 我国报废组件回收处理现状研究

(1) 文献查阅与新闻总结目前报废组件逆向物流回收系统以及存在的回收处理技术。

(2) 对比分析我国光伏组件废弃物回收政策及其实践与国际上光伏组件废弃物回收政策及其实践，总结差距。

### 2. 我国光伏组件报废量预测研究

(1) 通过文献查阅总结分析目前存在的光伏组件报废量预测方法。

(2) 对比分析灰色预测模型与神经网络预测模型对光伏装机容量预测的精确度，选取模型预测未来我国光伏装机容量。

(3) 依据组件质量不同，将组件划分为四种退化情景，采用威布尔分布模型分析不同退化情景下光伏组件使用寿命分布情况。

(4) 采用市场供给 A 模型预测四种退化情况下光伏组件报废量情况，并计算出组件中组成材料报废量。

### 3. 废弃光伏组件回收网络规划模型研究

不同于传统的电子废弃物，如手机、“四机一脑”等报废产品，报废分布分散，几乎每家每户都会报废，光伏发电系统分为了大型地面集中式光伏发电和户用分布式光伏发电，前者占地面积大，报废分布集中，利于收集回收，而后者类似于手机，报废分布分散，不易回收，且光伏产品拆解难度大，用户无法自行拆解，因此本研究在建立报废光伏组件回收网络模型时，将客户群体分为两种，并考虑现场拆解成本计入回收成本，具体内容如下：

报废光伏组件在回收过程中会涉及到用户、现场拆解企业、回收企业、拆解处理企业、再制造企业以及垃圾填埋企业，因此本研究将建立包含客户区、回收中心、拆解处理中心、再制造中心以及填埋场的四层回收网络系统，其中将客户区分为集中式光伏客户和分布式光伏客户，假设现场拆解行为为回收中心代处理，以整体网络成本最小化为目标，即典型的混合整数网络规划模型问题（MILP 模型），从而得出合理的回收网络系统。

### 4. 报废光伏组件回收网络规划应用研究。

本章将以江苏省为例进行应用研究，江苏省作为光伏装机大省，连续三年排名全国前三，未来装机也将不断上升，因此以江苏省为例进行报废组件回收网络规划具有参考性。

## 1.5 研究方法与技术路线

### 1. 我国报废组件回收处理现状

(1) 文献研究法。本研究通过大量的文献查阅总结国内外光伏产品回收现状，对比国内外光伏组件废弃物回收的政策及其实践，发现我国报废组件回收存在的问题。

### 2. 我国光伏组件报废量预测

(1) 文献研究法。本研究通过大量的文献查阅总结影响光伏组件报废的因素，并获取模型求解所需的相关数据。

(2) 市场供给 A 模型。市场供给 A 模型对市场供给模型进行了优化，该模型产品的寿命不是固定不变值，而是每一寿命都存在一定的概率。在此基础上，根据组件装机容量和寿命分布来预测组件报废量。

(3) 威布尔分布模型。光伏组件的使用寿命还要受到产品质量因素、环境因素以及运维管理因素等影响，而对于产品寿命分析采用最多的为威布尔分布，其模型中形状参数的变化使得模型既能为指数分布，又能为瑞利分布，被广泛应用于处理各种寿命试验的数据。

(4) BP 神经网络模型。BP 神经网络实现了以任意精度逼近任何非线性连续函数，具有高度自学习和自适应的能力，映射能力强。

本研究技术路线如图 1.1 所示。

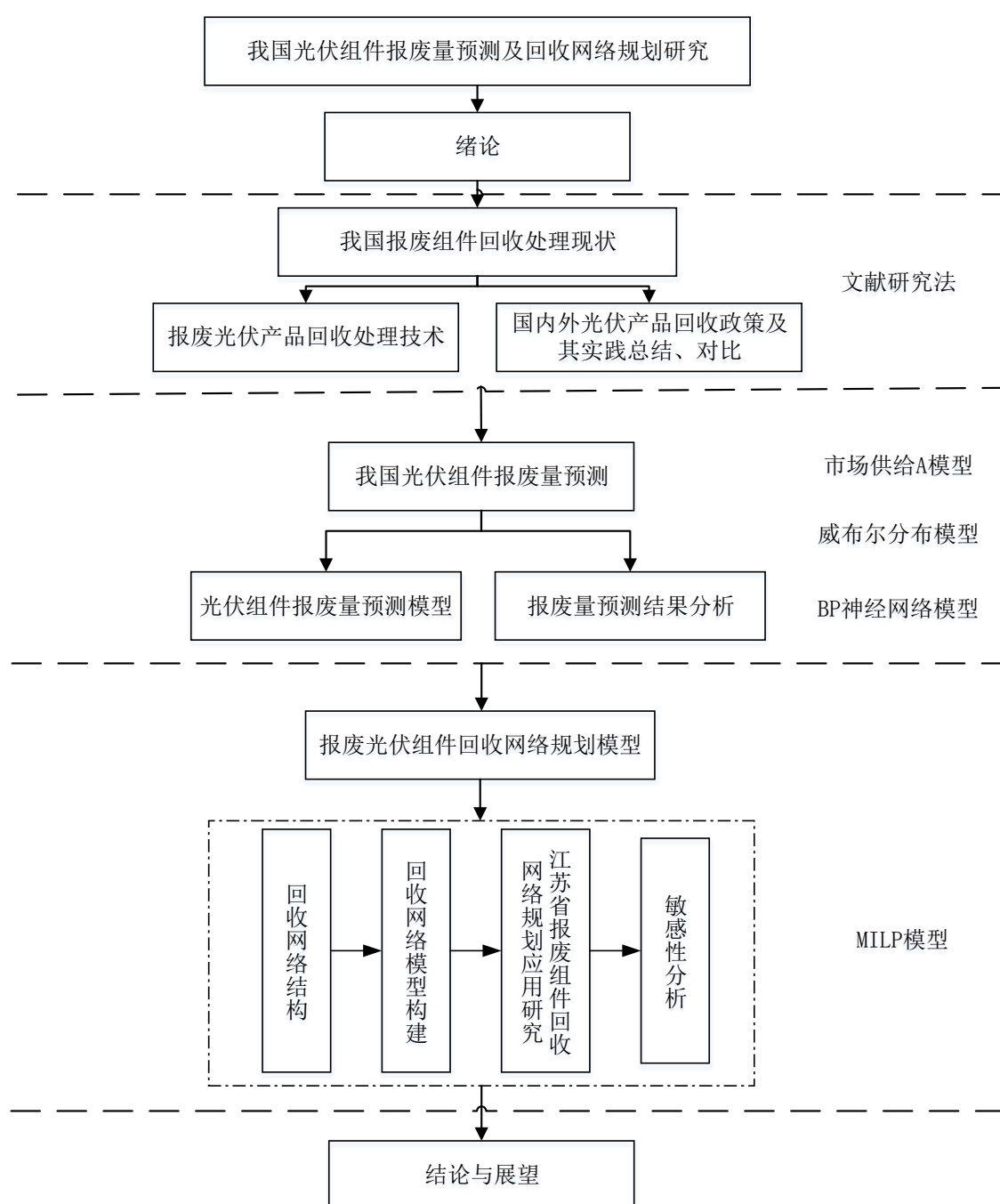


图 1.1 技术路线

## 1.6 研究创新点

### 1. 组件报废量预测方面

目前国内外有关光伏组件报废量的预测主要考虑组件使用寿命不变来进行线性预测，而在实际情况中，由于组件工作环境的变化、前期安装、运输等因素的影响，组件使用寿命会随之

产生变化。本文的创新点在于考虑光伏组件质量情况下，将组件寿命分为四种退化情景，采用威布尔分布模型分析组件寿命分布概率，从而使得组件报废量的预测更加精确，贴近于实际。

## 2. 回收网络规划方面

光伏产品相对于手机、汽车等产品，报废分布更加复杂，本研究的创新点在于考虑光伏发电系统分为集中式光伏和分布式光伏两种客户区，并考虑到用户无法自行拆解光伏产品，本研究创新性的将现场拆解成本算入报废组件回收成本中，使得回收网络规划模型更加贴近于光伏产品回收的实际。



## 第二章 我国报废组件回收处理现状

### 2.1 报废光伏组件逆向物流回收系统

#### 2.1.1 报废组件市场

目前,我国光伏产业已经成为国家战略性新兴产业之一,在产业政策和市场需求的双重作用下,中国光伏市场发展迅猛,截至 2018 年,我国光伏新增装机容量达到 44.26GW,累计装机超过 170GW,蝉联全球光伏装机第一(如图 2.1 所示)。同时,2018 年我国光伏产品已出口至 180 多个国家和地区,出口市场不再以欧美传统市场为主<sup>[1]</sup>,我国已成为光伏组件生产和应用大国。

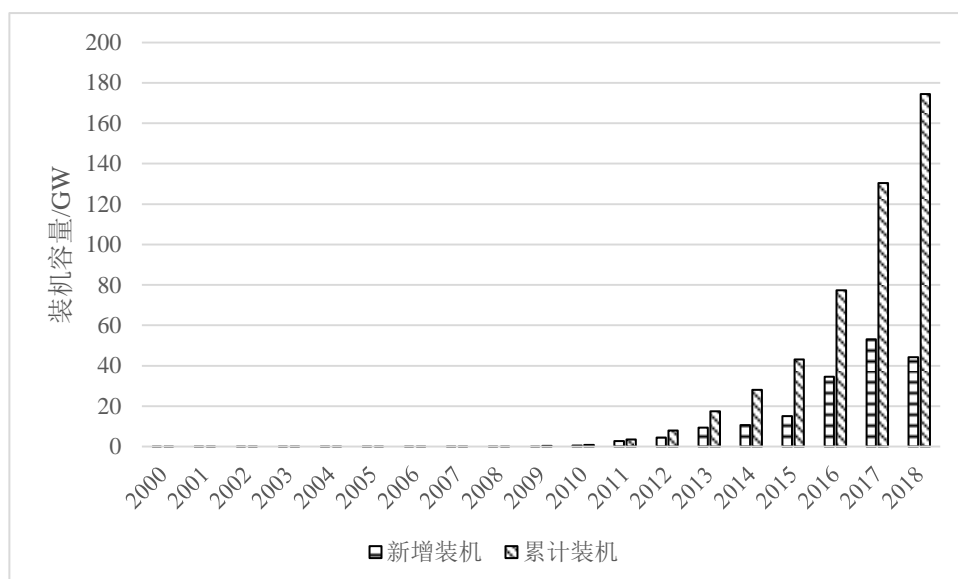


图 2.1 2000-2018 年我国光伏装机容量<sup>[1]</sup>

光伏寿命一般在 25~30 年之间,目前虽然还没有出现光伏产品大规模退役现象,但可以预见,在光伏产品服役期满后,报废光伏产品的回收处理将成为无法忽视的严峻问题。光伏组件作为光伏系统的核心产品,也是光伏服务期满后环保处理的主要部件。光伏组件中含有大量如硅、银、铜、铝等有价值资源,大部分的组成材料都可以循环再利用,因此提高报废组件的回收效率,既能够节约资源,也能够减少对一次原材料(即原生资源)的使用,从而实现对生态环境的保护。以 1MW 组件为例,按照 70~100t 计算,那么 100 GW 的组件重量为  $7 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$  t,废弃物量巨大,因此,未来的报废组件市场巨大,提前做好回收处理大量光伏组件废弃物的准备很有必要。

#### 2.1.2 报废组件逆向物流回收系统



本文研究的对象是用户使用后退役的报废组件回收，该部分的报废组件逆向物流回收系统会涉及到组件用户、组件现场拆卸企业、回收企业、拆解处理企业、再制造与再利用企业以及废弃物填埋企业，见图 2.2。

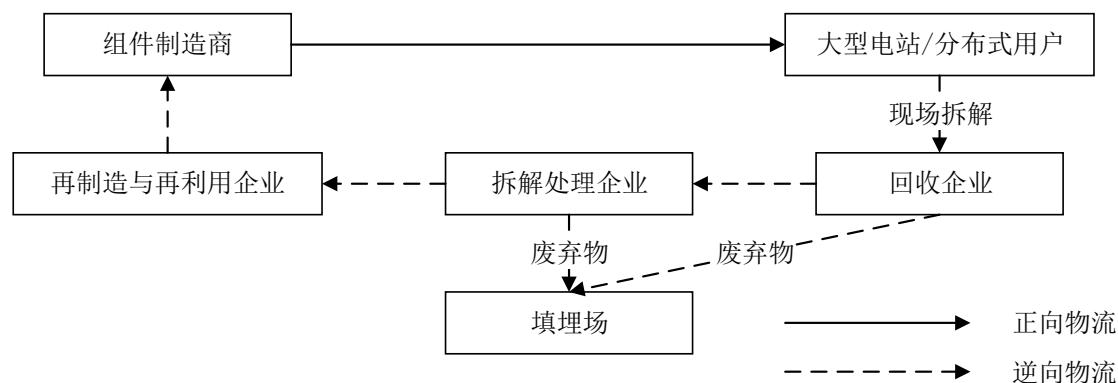


图 2.2 报废组件逆向物流回收系统

(1) 组件用户。目前光伏发电系统主要分为大型地面集中式光伏发电、分布式光伏发电两种，因此组件的使用者也将分为集中式用户（多为大型发电企业），以及分布式用户（多为工商业用电企业以及家用发电居民）。对于集中式用户，占地面积大，地处偏远地区，报废组件较为集中，易于集中回收；对于分布式用户，占地面积小，多建于建筑屋顶，报废组件较为分散，不易于集中回收。

(2) 现场拆解企业。光伏发电系统安装质量要求高，且多处于高空或者海面，这就导致用户无法自行拆解组件，需要专业的现场拆解人员拆解后进行回收。

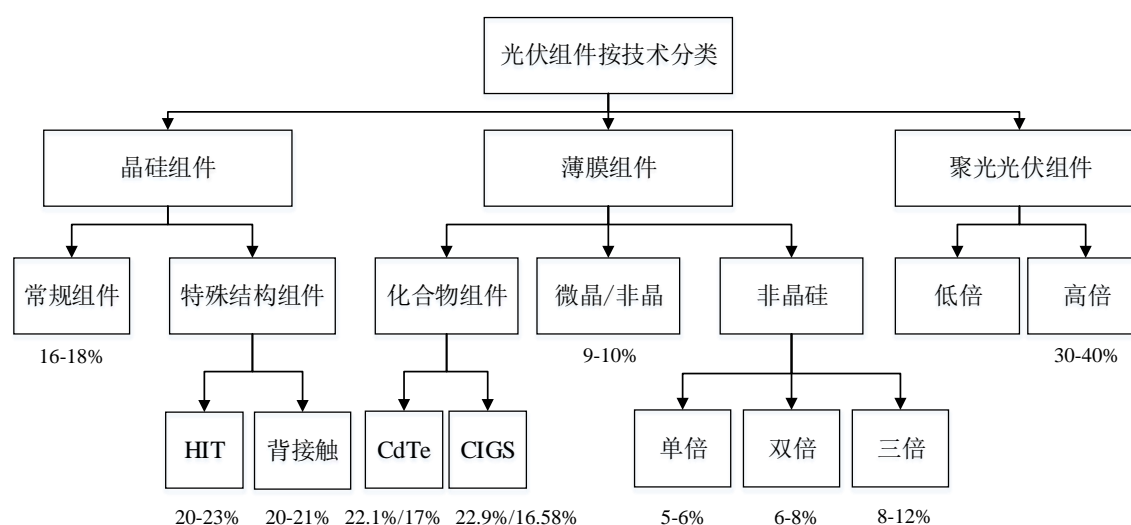
(3) 回收企业。对于光伏组件回收企业主要有组件生产制造商、第三方回收企业以及生产企业联盟，而目前我国还没有规范的组件回收企业在做相关的报废组件回收，一般都是对生产制造产生的报废组件进行回收处理，将其运往有相似属性的电子废弃物回收点进行回收。

(4) 再制造和再利用企业。光伏组件中含有大量的如铝、粘合密封胶、硅、银、铜、镓等有价值材料，未来光伏组件原材料最大的供应来源将不再是矿山而是来自于光伏组件自身的循环再利用，因此，光伏组件组成材料的再制造与再利用对于企业至关重要。

(5) 填埋场。光伏组件中不仅含有大量有价值材料，还含有如铅、碲、镉等有毒有害金属，其在回收循环系统中产生的废弃物将不能当作一般废弃物进行处理，而需要当作危险废弃物进行特殊填埋处理。

## 2.2 报废光伏组件回收处理技术

目前，全球光伏组件主要分为三类，即晶硅(c-Si)组件、薄膜组件和聚光光伏组件(CPV)，如图 2.3 所示。由于 CPV 组件还处于实验室试验阶段，因此本文不做讨论。



### 1. 晶硅组件

晶硅组件是世界上最常见的太阳能电池类型,2018 全球太阳能电池组件产量达到 120GW,其中晶硅电池约占全球太阳能电池总产量的 93%,它也是向光伏应用供应电源组件的主导者,市售的多晶硅太阳能电池的效率约为 16-18%。由于光伏组件需要接触外部环境工作,组件结构安装要求较高,晶硅太阳能电池组件从上到下一般的结构为盖板玻璃→EVA→太阳能电池片→EVA→背板,晶硅组件的回收拆解技术核心是如何有效破坏 EVA/PVB 胶膜。

### 2. 薄膜组件

薄膜组件一般是应用于固体背衬材料的半导体材料的薄层,与硅晶片相比,薄膜大大减少了每个电池所需的半导体材料的量,因此降低了光伏电池的生产成本,目前市场流通的薄膜组件主要包括铜铟镓硒(CIGS)、碲化镉(CdTe)、砷化镓(GaAs)等。全球 CIGS 和 CdTe 电池目前实验室最高转换效率分别达到 22.9%和 22.1%,性能稳定,组件全面积最高转换效率已提升到 16.58%和 17%(如图 2.3 所示),技术上仍有提升空间,发展前景较好。以 CIGS 组件为例,其典型结构为面板玻璃→封装材料(EVA/PVB)→TCO→CdS→CIGS→Mo→玻璃衬底,回收 CIGS 组件时,一般采用粉碎筛选。

### 3. 回收处理技术

在理想的闭环生命周期中,在每个阶段所产生的废物要最小化,并且对自然资源的使用最小化,同时对环境的其他负担也是最小的,而在现实生产中,光伏组件的生命周期并不完美(见图 2.4)。目前,原料生产阶段,企业对自然资源的金属供应依赖较高,且在原材料生产过程中金属利用率不高,会产生一定的金属损失;在光伏组件制造过程中会产生制造废物,即在晶片切片过程中产生的浆料废料(其中内含有价值的 c-Si 可以回收)、在薄膜沉积废物中的贵金属(如 CIS、CIGS),但回收程度在在很大程度上取决于废物的类型;消费品的材料回收目前几

乎不存在, 因为光伏产品服务期未滿, 报废产品尚未提供, 其回收在技术和经济上具有挑战性。因此, 目前大部分的研究主要集中在三个主要的回收途径, 即制造废物回收, 报废或二手组件材料回收, 再制造和再利用。

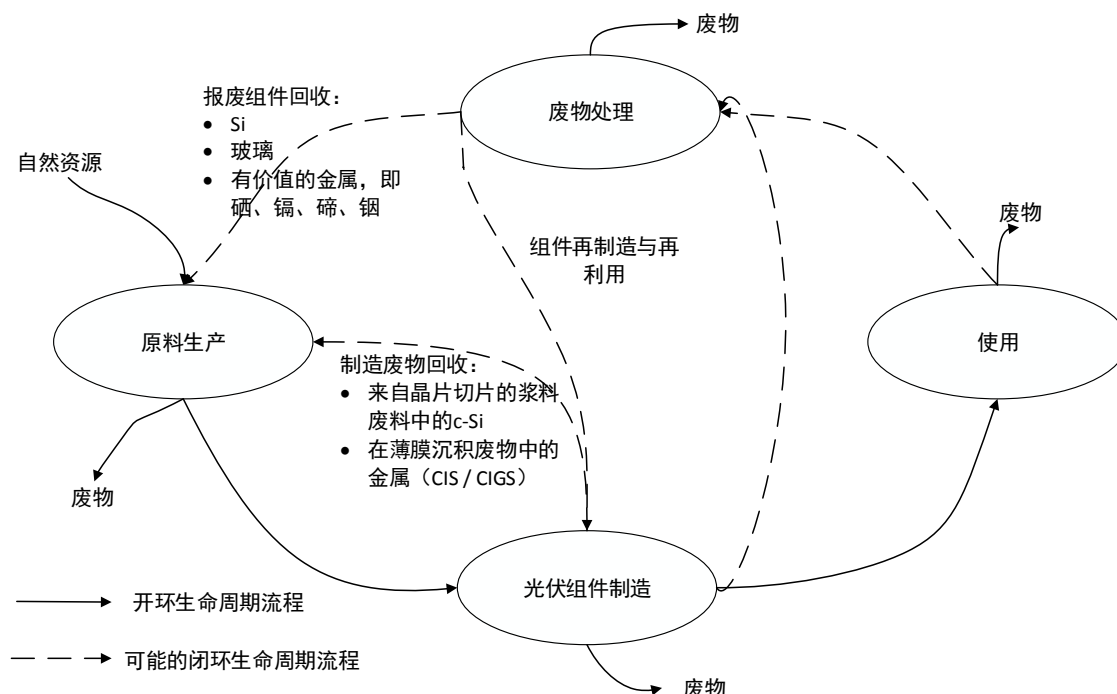


图 2.4 光伏组件生命周期

我国光伏企业对于报废光伏组件的回收处理技术, 主要有三类, 即组件分层、物质分离和物质提取/净化, 见图 2.5。

在分层阶段, 企业常用机械分离或热处理来去除封装, 而不同材料部分（玻璃, EVA 和薄膜材料）的混合物必须在后面的工艺步骤中再次分离。热处理和低温过程对能量需求较高, 在热处理过程中, 回收热量或使用来自其他过程的废热可以改善能量平衡。使用溶剂进行分层能够有效地分离 EVA 和玻璃, 但分离出来 EVA 是否可以重复使用或再循环利用还需要进行再测试, 特别是对于高度交联的 PE, 材料回收非常困难。

在物质分离过程中, 通过浸出处理不同的废物流, 例如破碎的材料、磨损的材料、生产残余物或完整的基质。在分离过程中采用热解和真空爆破组合, 对完整组件和材料混合物（金属和磨料）进行化学处理, 同时选择湿法处理粉碎部分（磨损）并筛选出 200mm 以下的部分（清洁的玻璃保留在筛网中）用于进一步的湿化学处理。

在物质提取/净化过程中, 湿法冶金工艺稳健且技术成熟, 适用于低等级材料的回收和相对较低的吞吐量。目前我国光伏企业回收处理技术大多处于分层以及物质分离进行简单粗糙的回收处理, 如英利、天合光能等, 对组件中有价值材料进行提取净化时技术较低, 报废光伏组件的回收处理技术成为难点。

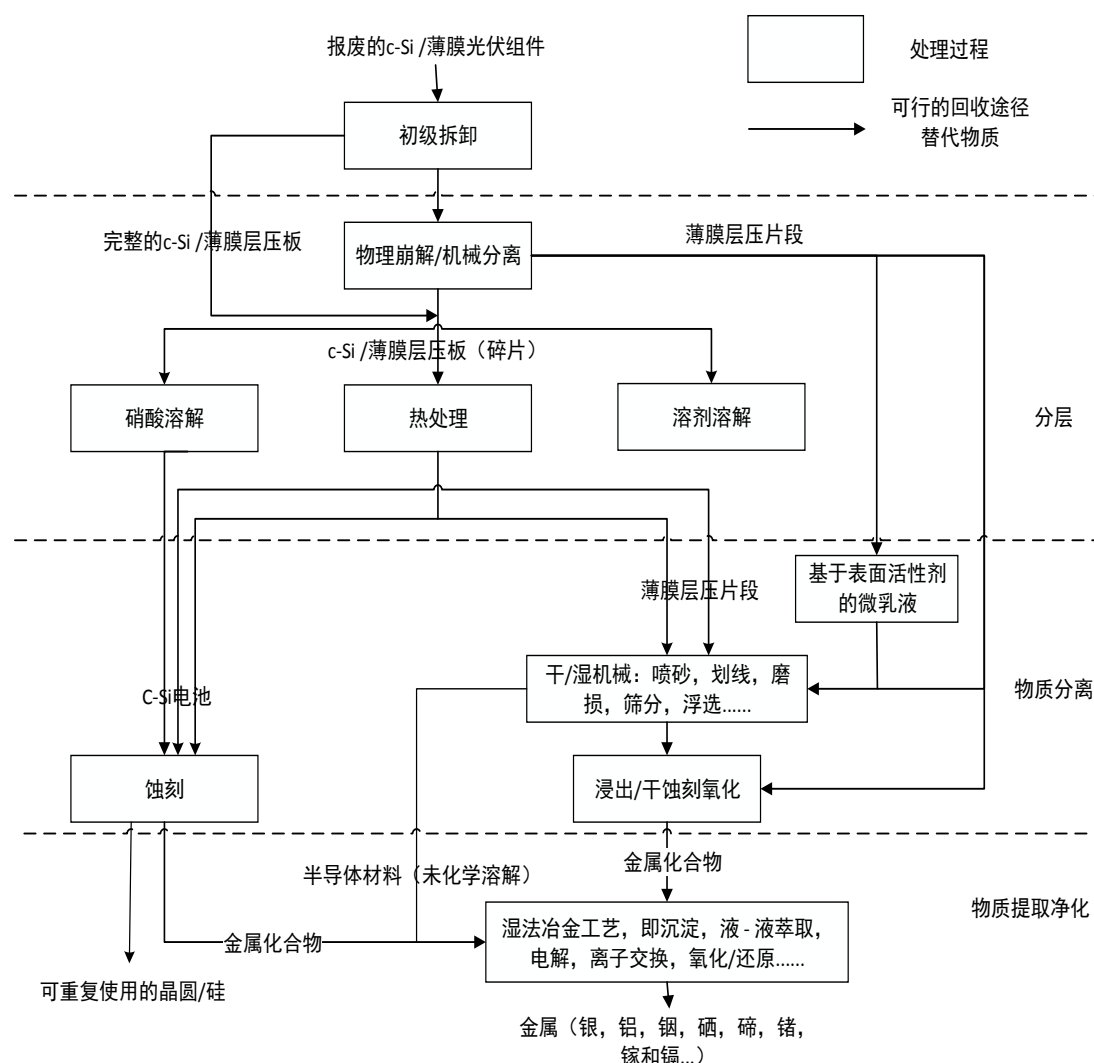


图 2.5 报废光伏组件回收处理技术路径

## 2.3 报废光伏组件回收相关政策

### 2.3.1 我国报废组件回收的相关做法

#### 1. 政府方面

我国国内企业和政府对于报废光伏组件的回收处理多集中于政企合作，进行技术攻关，如在“十二五”期间，国家科技部开展 863 课题对“光伏组件的无害化处理和回收利用”进行了研究，详情见 1.1.1；2019 年 11 月，青海省工信厅拨出 600 万元资金支持黄河公司“晶硅光伏组件回收材料分选关键技术研究”、“晶硅光伏组件回收硅材料提纯技术研究”和“晶硅光伏组件可产业化选择性剥离技术研究”三大技术创新项目，来将退役的光伏组件分类拆解，回收可重复利用的铝、硅、玻璃等材料，使材料的再循环利用率达到 90% 以上，变废为宝，这也是我

国企业响应国家政策的一个重大突破；同时国内也对电废物的回收处理做出了响应，如《废弃电器电子产品回收处理管理条例》，但并未涉及光伏组件的回收与再利用。虽然企业和政府开始对报废组件关注，但多是回收处理的技术储备，对于如何回收利用，回收的政策法律法规方面仍然是一片空白。

## 2. 企业方面

目前，我国虽然有光伏企业自行愿意组成联盟（如光伏行业协会）对报废产品回收问题展开讨论与研究，如 2017 年中国光伏行业协会批准发布 6 项标准，即《地面光伏组件 光伏组件设计鉴定和定型质量保证导则》、《晶体硅光伏组件回收再利用通用技术要求》、《地面用晶体硅光伏组件外形尺寸及安装孔技术要求》、《光伏组件封装用乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)胶膜》、《光伏涂锡焊带》、《光伏组件封装用共聚烯烃胶膜》，但没有形成规模化效应，企业对报废产品回收处理规范与技术也没有形成一定的标准，行业回收标准缺乏统一性与独特性。

### 2.3.2 国际上报废组件回收的相关做法

国外光伏发电发展较早，组件已经开始大批量的报废，相关国家针对报废组件出台了一系列的回收政策，着手光伏组件的回收。

#### 1. 美国

2010 年，美国加利福尼亚州的有毒物质控制局（DTSC: Department of Toxic Substances Control）提出了将光伏电池从有害废弃物类别中排除的方案，其前提是电池厂商能够自主实施回收利用计划。2012 年 8-10 月，DTSC 向公众征求了废弃物回收的提案，2013 年对其提案作了最终修改。

#### 2. 欧盟

2012 年，欧盟报废电子电气设备(WEEE)指令第一次将光伏组件纳入指令范围，规定报废组件归为家用电器类强制回收处理，根据修订，对 2019 年以前使用过的光伏组件的集中回收率必须达到 85% 以上，组件材料的再循环利用率必须达到 80% 以上。此外，与其他废弃物一样，报废组件需要遵守包括《废弃物框架指令》、《废弃物运输条例》等在内的欧洲其他废弃物法规。2014 年 10 月，在 IECTC82WG2 的会议上，提出将《光伏组件的回收与环境安全评估》作为新的工作组项目提案（NWIP）并展开了讨论，制订组件回收以及环境安全评估的 IEC 标准。目前，欧洲已经开始从标准法规层面来对报废组件进行强制回收。

同时，2007 年，在国际范围内，出现了光伏组件回收企业联盟 PV Cycle 协会，旨在实施光伏行业的报废光伏组件自愿回收和再循环计划，其完全由制造商和进口商提供资金，目前会员数占欧洲市场的 90% 以上<sup>[59]</sup>。PV CYCLE 成员致力于确保太阳能组件的收集和回收以及成本融资，包括通过收集点，运输和专业回收系统收集组件，回收的产品主要包括光伏组件废弃物、

电子电气设备废物、电池废物、工业废料、包装废物、生产废料。从 2010 年 PV Cycle 开始运营, 该联盟回收处理总量超过 1504t 的废旧光伏组件, 其回收活动减少大约 12800t 二氧化碳排放量, 相当于超过 76000 棵新树 (2015 年 PV Cycle 年报), 到 2016 年回收处理光伏组件废物达到 1803t, 2016 年 PV Cycle 硅基组件、非硅基组件的回收率分别达到了 96%、98%<sup>[60]</sup>。预计到 2035 年, PV Cycle 协会的光伏组件回收价值将达到 120 亿美元, 国际影响力巨大。

2018 年, 法国威立雅与欧洲光伏组件回收组织 PV Cycle、法国可再生能源工会合作, 欧洲首座太阳能电池板回收工厂正式投入运营。该工厂在 2018 年回收了 1,300t 光伏组件, 实现了晶硅组件中 95% 的材料回收率, 并设立了 2022 年回收 4,000t 的目标。

### 3. 日本

2004 年, 日本出台《关于太阳能电池类物品废弃处理的法律事项》, 对光伏组件废弃物的回收处理提出了一系列注意事项要求。2016 年, 日本发布《推进光伏发电设备回收等的方针》政策, 该规定提出, 报废的光伏设备必须根据《废弃物处理法》及《建设回收法》等进行处理, 并对发电设备所有者、废弃者、撤除商及收集运输商等相关业者, 分别归纳了相关的法律制度及注意事项等基本事项。

## 2.3.3 我国报废组件回收处理存在的问题

根据上述对比分析, 我国光伏行业起步较晚, 对于法律法规、回收处理与利用以及回收意识方面都与国外有着一定的差距, 我国对于报废组件的回收处理存在着一系列的问题。

### 1. 法律法规空白

通过分析, 我国政府对报废组件的回收政策与扶持项目主要集中于回收处理技术, 而对于回收处理企业的资质认定以及再利用标准等方面一片空白, 不利于组件的回收再利用, 易导致行业混乱。

### 2. 回收收集难, 回收标准匮乏

光伏产品与传统的电子电器产品不同, 光伏系列产品直接在外部空气中发电, 受到地理位置以及气候等因素影响大。对于集中式光伏电站, 占地面积大, 每安装一个固定 1MW 的太阳能光伏电站需要 20000m<sup>2</sup> 的面积; 地理位置偏僻, 对于安装在西北大型光伏电站地区为例, 光伏电站大都建在偏僻处, 运输收集成本高, 企业从报废产品中获得的价值金属的利益难以抵消掉高昂的运输成本。对于分布式光伏, 由于用户高度分散不够集中, 传统的集中收购方式不适用且回收成本较高, 所以企业缺乏回收动力。若不采取强制措施, 单从经济上衡量, 光伏投资企业一般都难以主动回收处理。

### 3. 回收意识薄弱

目前国内无论是政府、企业还是光伏产品使用者, 对报废组件的回收意识仍然薄弱, 虽然

有部分企业参与到组件的回收，但大部分企业仍重点关注在光伏产品的运营与维护。而对于用户来说，目前由于分布式光伏仍在市场飞快渗透阶段，居民对光伏报废产品的意识薄弱，使用过的废物随手乱丢现象是寻常现象，同时由于缺乏政府的宣传倡导，很少有用户愿意主动支持回收。

## 2.4 本章小结

随着光伏行业发展的爆发，报废光伏产品也需要得到关注，本章对比国内外报废组件回收处理概况，总结出我国报废组件回收存在的问题，即我国的报废组件回收处理还处在相对落后的地步，不仅政府没有相关回收法律法规出台，企业以及居民对报废产品的回收意识也较为薄弱。同时，面对未来大规模的报废组件，建立合理有效的组件回收处理系统很有必要，为此，本文接下来将结合报废组件市场量及其废弃物特殊性，对报废组件回收处理企业进行统筹规划，合理布局，建立包括用户、回收、拆解处理、再制造和废弃物填埋在内的完善的逆向物流网络系统，对报废组件进行有效回收。

### 第三章 我国光伏组件报废量预测

#### 3.1 光伏组件报废量预测模型

根据 1.2.1 文献分析,由于还没有关于我国光伏产品废弃物规模的研究,借鉴有相似属性的电子废弃物的预测方法,通过对比,本文采用市场供给 A 模型来预测光伏产品报废量。该模型是对市场供给模型的改进,不仅考虑了产品的销售情况,还考虑到不同使用寿命的分布概率值。

市场供给 A 模型公式如下所示:

$$Q_{wi} = \sum S_i P_i \quad (3.1)$$

其中,  $Q_{wi}$  为第  $i$  年光伏组件报废量;  $S_i$  为从该年算起  $i$  年前光伏组件的销售量;  $P_i$  为寿命为  $i$  年的光伏组件的百分比;  $i$  为光伏组件实际寿命,即报废年限。本研究以每年的光伏装机容量代表光伏组件销售量。

##### 3.1.1 光伏装机容量预测模型

根据公式 (3.1),对 2019-2050 年我国光伏组件报废量的预测,首先需要对 2019-2050 年我国光伏装机容量情况进行预测,常见的预测方法包括:判断分析法、时间序列法、回归分析法、灰色预测法以及神经网络等方法。本文使用灰色预测、BP 神经网络预测两种方法对 2019-2050 年光伏装机容量进行预测,并比较两种预测方法的准确精度。

###### 1. 灰色预测模型<sup>[28]</sup>

灰色预测是基于对系统演化不确定性特征的认识,运用序列算子对原始数据进行生成、处理,挖掘系统演化规律,建立灰色系统模型,对系统的未来状态作出科学的定量预测。光伏装机容量既包含已知信息,也有未知、未确定信息,因此可以将其看作一个灰色系统。本文拟采用 GM(1,1)模型来进行预测,其表示一阶一变量的灰色微分方程模型,是目前使用最广泛的灰色动态预测模型。

###### (1) GM(1,1)预测模型

给定原始序列:  $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ , 其中  $x^{(0)}(k) \geq 0 (k = 1, 2, \dots, n)$ , 对该原始序列做一次累加生成,生成序列  $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ , 其中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3.2)$$

则将形如  $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$  的方程称为 GM(1,1)模型的原始形式。

$Z^{(1)}$  为  $X^{(1)}$  的紧邻均值生成序列,  $Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n))$ , 其中

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)), k = 2, 3, \dots, n \quad (3.3)$$



则将形如  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  的方程称为 GM(1,1)模型的基本形式。

若  $\hat{a} = [a, b]^T$  为待估参数列且

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

则 GM(1,1)模型  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  的最小二乘估计参数列满足:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3.5)$$

GM(1,1)模型  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  的白化方程 (也称影子方程) 为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (3.6)$$

则 GM(1,1)模型  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  的时间响应序列 (即累加模型预测结果) 为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.7)$$

还原后的预测结果为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1 - e^a) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

将图 2.1 中 2000-2018 年我国光伏装机容量数据作为原始数据来按照上述 GM(1,1)模型预测步骤来进行拟合和计算, 得出结果如表 3.1 所示。

表 3.1 GM(1,1)模型预测结果

年份	实际数据 (GW)	预测数据 (GW)	残差	相对误差
2000	0.0033	0.0033	0	0
2001	0.0057	1.92	-1.92	335.98
2002	0.0203	2.78	-2.76	135.75
2003	0.01	4.01	-4.00	400.19
2004	0.01	5.80	-5.79	578.80
2005	0.005	8.38	-8.37	1674.88
2006	0.01	12.11	-12.10	1210.01
2007	0.02	17.50	-17.48	874.09
2008	0.04	25.29	-25.25	631.35
2009	0.16	36.56	-36.40	227.47
2010	0.52	52.83	-52.31	100.60
2011	2.7	76.35	-73.65	27.28
2012	4.5	110.34	-105.84	23.52
2013	9.43	159.47	-150.04	15.91
2014	10.6	230.47	-219.87	20.74
2015	15.13	333.08	-317.95	21.01
2016	34.54	481.37	-446.83	12.94
2017	53.06	695.69	-642.63	12.11
2018	44.26	1005.43	-961.17	21.72
平均相对误差				332.86

由表 3.1 可以看出, GM(1,1)模型预测的平均相对误差很大, 预测效果偏差大, 该模型对我国装机容量的数据拟合效果差。

## (2) Verhulst 预测模型

GM(1,1)模型能够较好的描述具有较强指数规律的序列, 但只能描述其单调的变化过程, 而对于具有饱和的“S”型序列或者非单调的摆动序列, GM(1,1)模型则不能满足要求, 预测误差较大。根据国家《可再生能源发展“十三五”规划》和《太阳能发展“三五”规划》, 我国光伏新增装机将呈现“S”型增长曲线, 即初级阶段、快速增长阶段、饱和阶段和下降阶段, 若不考虑光伏发电下降阶段, 光伏装机容量将趋于饱和, 呈现“S”型曲线。Verhulst 模型主要用来描述具有饱和状态的过程, 即 S 型过程, 常用于人口预测、生物生长、繁殖预测和产品经济寿命预测等。下面本文采用 Verhulst 模型对我国光伏装机容量进行预测。

同 GM(1,1)模型给定原始序列以及做一次累加生成序列和紧邻均值生成序列, 则称  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b(z^{(1)}(k))^{\alpha}$  为 GM(1,1) 幂模型。当  $\alpha = 2$  时, 称  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b(z^{(1)}(k))^2$  为灰色 Verhulst 模型。

若  $\hat{a} = [a, b]^T$  为待估参数列且

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

则 Verhulst 模型的最小二乘估计参数列满足:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3.10)$$

Verhulst 模型的白化方程为:

$$\frac{d_{x^{(1)}}}{d_t} + ax^{(1)} = b(x^{(1)})^2 \quad (3.11)$$

则 Verhulst 模型  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  的时间响应序列 (即累加模型预测结果) 为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{ax^{(1)}(0)}{bx^{(1)}(0) + (a - bx^{(1)}(0))e^{ak}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.12)$$

还原后的预测结果为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

表 3.2 Verhulst 模型预测结果

年份	实际数据 (GW)	预测数据 (GW)	残差	相对误差
2000	0.0033	0.0033	0	0
2001	0.0057	0.01	0	0.68
2002	0.0203	0.03	-0.01	0.37
2003	0.01	0.08	-0.07	7.03
2004	0.01	0.23	-0.22	22.19
2005	0.005	0.67	-0.66	132.30
2006	0.01	1.88	-1.87	187.48
2007	0.02	5.10	-5.08	254.12
2008	0.04	12.41	-12.37	309.31
2009	0.16	24.54	-24.38	152.39
2010	0.52	37.02	-36.50	70.20
2011	2.7	44.90	-42.20	15.63
2012	4.5	48.46	-43.96	9.77
2013	9.43	49.82	-40.39	4.28
2014	10.6	50.31	-39.71	3.75
2015	15.13	50.48	-35.35	2.34
2016	34.54	50.54	-16.00	0.46
2017	53.06	50.56	2.50	0.05
2018	44.26	50.56	-6.30	0.14
平均相对误差				61.70

将图 2.1 中 2000-2018 年我国光伏装机容量数据作为原始数据来按照上述 Verhulst 模型预测步骤来进行拟合和计算, 得出结果如表 3.2 所示。

根据表 3.2 预测结果可以看出, Verhulst 模型预测效果相对 GM(1,1)模型较好, 相对误差大幅度减小, 对 2013 年后的装机容量预测效果有显著进步, 但平均相对误差仍然较高, 总体预测效果仍然较差, 需要更有效的模型来进行预测。

## 2. 神经网络预测模型<sup>[61]</sup>

人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANN), 简称神经网络, 是对人脑或自然神经网络若干基本特性的抽象和模拟, 由大量神经元组成的非线性动力系统。神经网络可以从不完善的数据和图形中进行学习并做出决定, 具有很强的容错性, 并能够根据所提供的数据, 通过学习和训练, 自适应的找出输入和输出之间的内在关系, 并有很强的模式识别能力。目前最常用的神经网络模型为 BP 神经网络 (Back Propagation Neural Network), 是一种基于误差反向传播算法的多层前向多层感知器, 可以实现从输入到输出的任意非线性映射。以三层 BP 神经网络为例 (见图 3.1), 包括一个输入层、一个隐含层和一个输出层, 其中输入节点以  $x_i$  表示, 隐含节点以  $y_j$  表示, 输出节点以  $z_l$  表示,  $t_l$  为输出节点期望值,  $w_{ji}$  为输入节点与隐层节点间的网络权值,  $v_{lj}$  为隐层节点与输出节点间的网络权值。

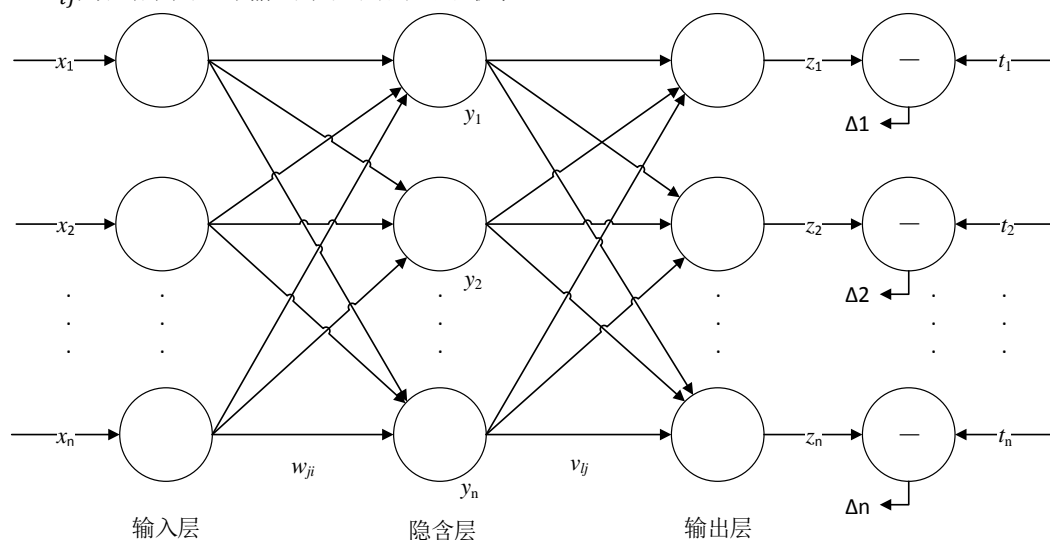


图 3.1 三层 BP 神经网络

根据 2000-2018 年我国装机容量可以看出 (见图 2.1), 我国装机容量并不是线性增长曲线, 因此可以采用 BP 神经网络对我国装机容量进行预测, 其具体计算步骤如下图 3.2 所示。

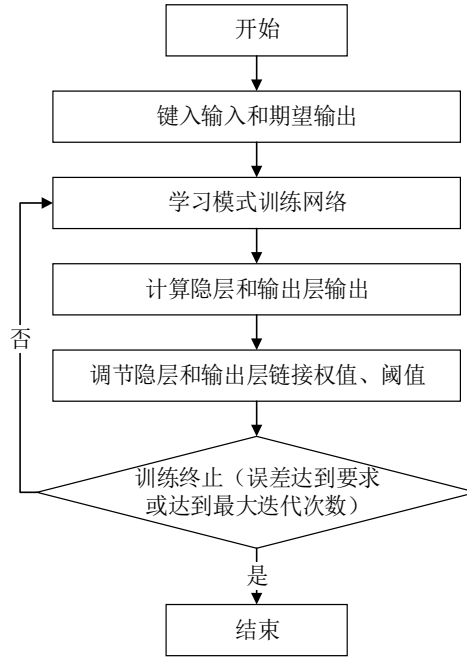


图 3.2 BP 神经网络计算过程

$$\text{隐层输出计算公式为: } y_j = f(\sum_i w_{ji}x_i - \theta_j) \quad (3.14)$$

$$\text{输出层输出计算公式为: } z_l = f(\sum_j v_{lj}y_j - \theta_l) \quad (3.15)$$

$$\text{输出节点误差计算公式为: } E = (\sum_l (t_l - z_l)^2)/2 \quad (3.16)$$

误差函数对输出节点分别对输入节点和隐层节点求导, 得到输入节点和输出节点误差计算公式分别为:

$$\delta_l = (t_l - z_l)f'(\sum_j v_{lj}y_j - \theta_l) \quad (3.17)$$

$$\delta'_j = f'(\sum_i w_{ji}x_i - \theta_j)\sum_l \delta_l v_{lj} \quad (3.18)$$

$$\text{输入层与隐层之间的权值修正计算公式为: } w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta'\delta'_j x_i \quad (3.19)$$

$$\text{隐层与输出层之前的权值修正计算公式为: } v_{lj}(k+1) = v_{lj}(k) + \eta\delta_l y_j \quad (3.20)$$

$$\text{输入层与隐层之间的阈值修正计算公式为: } \theta_j(k+1) = \theta_j(k) + \eta'\delta'_j \quad (3.21)$$

$$\text{隐层与输出层之前的阈值修正计算公式为: } \theta_l(k+1) = \theta_l(k) + \eta\delta_l \quad (3.22)$$

其中,  $x_i$  为输入节点, 即本研究中新增装机年份,  $y_j$  为隐层节点,  $z_l$  为输出节点,  $t_l$  为输出节点期望值, 即本研究中新增装机容量,  $\delta_l$  为输入节点误差,  $\delta'_j$  为隐层节点误差,  $\theta_j$  为隐层节点阈值,  $\theta_l$  为输出节点阈值,  $\eta'$  和  $\eta$  为学习率。

将图 2.1 中 2000-2018 年我国光伏装机容量数据作为原始数据来按照上述 BP 神经网络模型预测步骤来进行拟合和计算。本文使用 MATLAB R2016b 软件版本进行 BP 网络预测, 在进行网络训练时, 其中年份数据作为输入数据, 新增装机容量作为期望输出数据, 训练函数、自适应学习函数和误差函数分别选择 trainlm、learnsgdm 和 SSE(误差平方和函数), 通过不断试算,

设隐层节点数为 8，神经网络预测结果如表 3.3 所示。

表 3.3 BP 神经网络模型预测结果

年份	实际数据 (GW)	预测数据 (GW)	残差	相对误差
2000	0.0033	0.0033	0	0
2001	0.0057	0.0033	0.002	0.421
2002	0.0203	0.0033	0.017	0.837
2003	0.01	0.0033	0.007	0.670
2004	0.01	0.0033	0.007	0.670
2005	0.005	0.0033	0.002	0.340
2006	0.01	0.0033	0.007	0.670
2007	0.02	0.0033	0.017	0.835
2008	0.04	0.0033	0.037	0.918
2009	0.16	0.0033	0.157	0.979
2010	0.52	0.016	0.504	0.968
2011	2.7	2.540	0.160	0.059
2012	4.5	4.793	-0.293	0.065
2013	9.43	9.809	-0.379	0.040
2014	10.6	12.860	-2.260	0.213
2015	15.13	13.212	1.918	0.127
2016	34.54	34.495	0.045	0.001
2017	53.06	44.072	8.988	0.169
2018	44.26	44.073	0.187	0.004
平均相对误差				0.387

根据表中结果可以看出，使用 BP 神经网络预测能够很好的对数据进行拟合，相对误差和平均相对误差非常小，平均相对误差仅有 0.387，2011 年后的预测精度相较于 2010 年前的预测精度高，BP 网络整体预测精度较高。

#### 4. 三种方法预测结果精度的比较及我国装机容量的预测

根据上述预测方法绘制三种方法的预测曲线，如下图 3.3 所示。

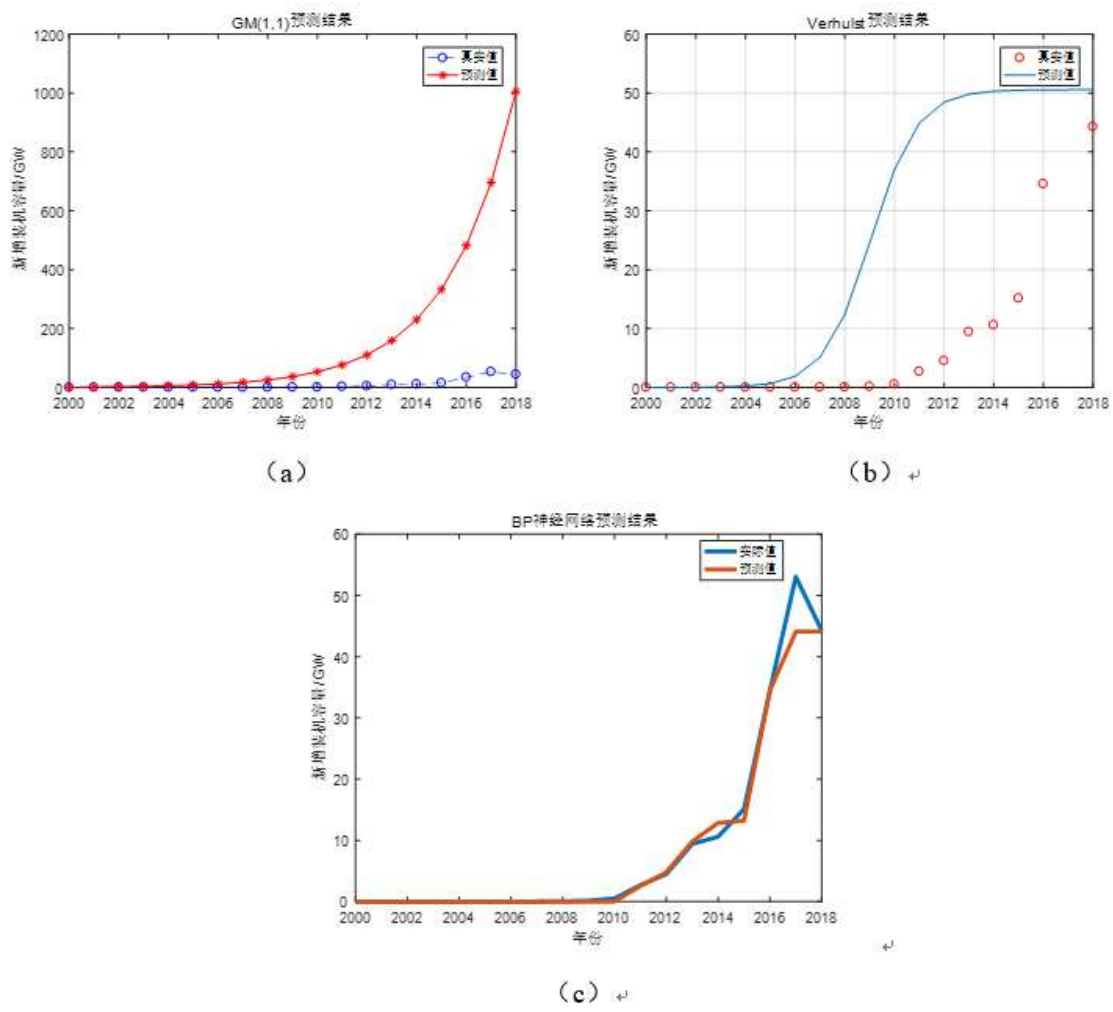


图 3.3 三种方法预测结果曲线图

表 3.4 三种方法预测结果对比

预测方法	GM(1,1)预测	Verhulst 预测	BP 神经网络预测
平均相对误差	332.86	61.70	0.39

根据图 3.3，BP 神经网络预测值与实际值最接近，预测效果最好，平均相对误差最小，仅为 0.39（见表 3.4），因此本文将选用 BP 神经网络模型对我国 2019-2050 年光伏装机容量进行预测，结果如图 3.4。

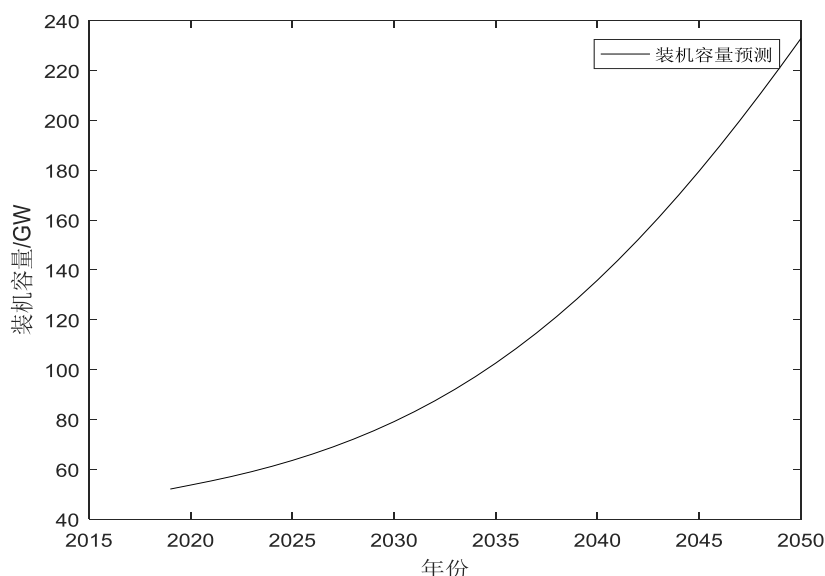


图 3.4 2019-2050 年我国光伏装机容量预测

根据图中结果显示，光伏装机容量呈增长趋势，到 2050 年，全国光伏新增装机容量将达到 232.8GW，根据国家可再生能源“十三五”规划，到 2050 年，我国非化石能源要占一次能源消费比重的 50%，因此我国光伏装机容量必然增长，由此产生的光伏组件报废量也将会大大增加。

### 3.1.2 光伏组件使用寿命分布模型

#### 1. 模型建立

光伏组件理论寿命一般为 25 年，但由于实际工作运行中出现故障的不确定性，光伏组件的寿命随着时间的演变需要通过概率分布函数来建模处理。

在不考虑自然灾害、人为等不确定因素，产品寿命分析通常有多种处理方法，采用最多的为威布尔分布<sup>[62],[63],[64]</sup>。威布尔分布是一种比较完善的分布，该分布函数包含指数分布、瑞利分布和正态分布等几种常用分布，在拟合随机数据方面十分灵活，适应性很强。在实际工作条件下，已经有大量研究使用威布尔分布描述 PV 组件故障的适用性，Kuitche<sup>[65]</sup>、王喜炜<sup>[66]</sup>等对比分析了指数分布、威布尔分布和对数正态分布三种分布，拟合监测的光伏组件退化数据，发现威布尔分布的拟合效果最好。Pilar Espinet-González 等<sup>[67]</sup>将光伏电池放在 119、126 和 164℃ 三种不同温度下进行测试，发现在三个测试温度下光伏电池的实效分布符合威布尔分布模型。Kumar & Sarkara<sup>[68]</sup>也得出威布尔分布模型适用于光伏组件的退化分布。威布尔分布基本公式如下：

$$\text{概率密度函数为: } f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad t \geq \gamma \quad (3.23)$$

$$\text{累积分布函数为: } F(t) = P(T \leq t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad t \geq \gamma \quad (3.24)$$



其中,  $F(t)$ 为光伏组件使用第  $t$  年的累积废弃率;  $\beta > 0$ 为形状参数, 即值的大小决定密度曲线的形状;  $\alpha > 0$ 为尺度参数, 也称特征寿命, 是一种寿命均值并给出分布中心的大致位置;  $\gamma > 0$ 为位置参数, 也称最小寿命。由于安装、运输和技术等因素, 光伏产品在开始便可能出现失效, 因此本研究取  $\gamma = 0$ , 此时光伏组件威布尔分布概率密度函数和累积分布函数分别为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad t \geq 0 \quad (3.25)$$

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad t \geq 0 \quad (3.26)$$

## 2. 光伏组件使用寿命分布概率分析

光伏组件的使用寿命与组件质量、现场工作环境等相关联, 理想化的光伏组件寿命一般为 25 年。我国光伏产业发展较晚, 早期的光伏产品质量参差不齐, 由于缺乏相关政策的监督, 组件的使用寿命也得不到相应的保证, 我国光伏产业质量发展主要分为两个阶段:

(1) 2013 年以前, 产业化建立阶段。2009 年, 我国“金太阳工程”和“光电建筑应用示范”二期特许权项目的开启, 使得光伏发电项目快速走向市场化, 装机容量保持每年 100%以上增长趋势, 但由于缺乏监管政策的管理, 光伏产品质量参差不齐, 光伏组件实际寿命相比 25 年预期寿命大打折扣。

(2) 2013 年以后, 规模化稳定发展阶段。2013 年 7 月国务院发布《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》, 使得光伏产业走向标准化, 新的光伏制造项目电池转换效率统一规定, 光伏产品质量得到保证。

基于上述背景, 本文对组件使用寿命做出两阶段假设: 2013 年前为 A 阶段; 2013 年后为 B 阶段。

在 A 阶段, 假设组件特征寿命达不到 25 年, 组件存在常规退化和早期退化两种情景, 将该阶段的特征寿命假设为 20.84<sup>[69]</sup>, 该参数的确定是通过监测广州某 10kW/160W 单晶硅组件 20 年的数据所得, 吕瑞瑞等人<sup>[70]</sup>也对 PET 结构背板使用寿命进行推算, 得出使用寿命为 20.3 年, 因此 20.84 的参数设置具有参考性。

在 B 阶段, 假设组件特征寿命满足 25-30 年的预期, 光伏组件存在常规退化和早期退化两种情景, 将该阶段的特征寿命假设为 30 年。

根据 IEA-PVPS/IRENA<sup>[71]</sup>, 对光伏组件两种退化情景的描述如下:

(1) 常规退化: 光伏组件初期安装合格、运维良好等, 组件的失效为正常运营后的技术失效, 符合正常失效规律。

(2) 早期退化: 由于安装不合格、规划不良等原因, 光伏组件从安装开始便出现退化。

光伏组件退化的威布尔分布参数设置如下图 3.5 所示。

表 3.5 光伏组件退化的威布尔分布参数

年份	在 A 阶段		在 B 阶段	
	常规退化 A1 <sup>b</sup>	早期退化 A2 <sup>a</sup>	常规退化 B1 <sup>b</sup>	早期退化 B2 <sup>b</sup>
$\beta$	5.3759	2.8304	5.3759	2.4928
$\alpha$	20.84	20.84	30	30

注：a 表示由余荣斌监测数据所得，b 表示根据国际能源署数据所得。

将表 3.5 数据代入公式(3.25)，得到如下图 3.5。

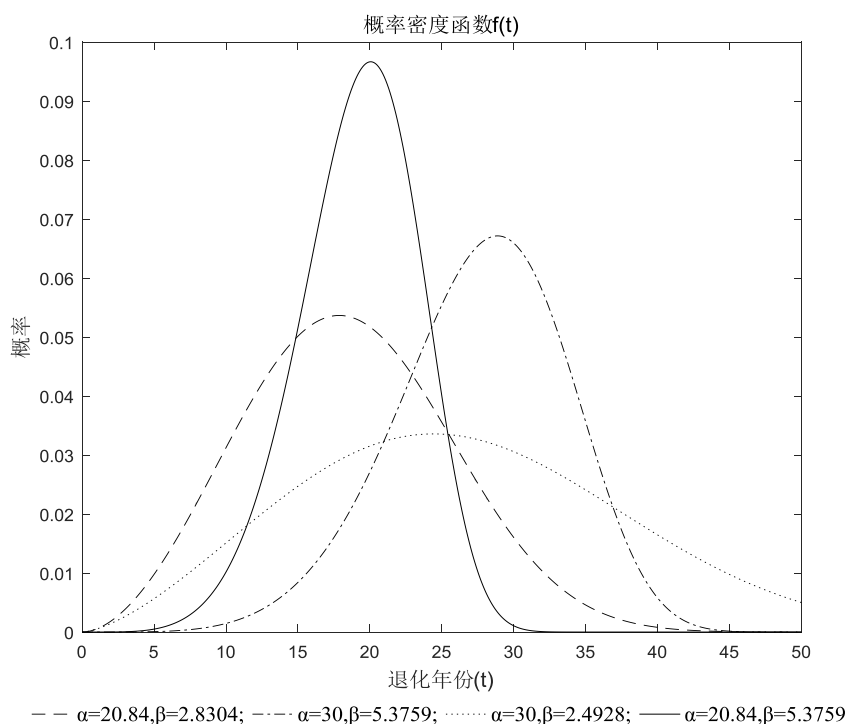


图 3.5 光伏组件退化概率密度分布函数

由图 3.5 可以得出如下结论：

在 A 阶段，光伏组件平均寿命为 20.84 年。在常规退化情况下，在电站运行第 4 年开始失效，有 93.01% 的组件在运行 25 年后失效，而在运行 30 年后全部失效。在早期退化情况下，81.25% 的光伏组件在运行 25 年后失效，40 年后光伏组件全部失效。

在 B 阶段，光伏组件平均寿命为 30 年。在常规退化情况下，在电站运行第 6 年开始失效，31.29% 的光伏组件在运行 25 年后失效，有 99.09% 的光伏组件在运行 40 年之后失效。在早期退化情况下，前 5 年有 1.14% 的光伏组件由于安装不合格、规划不良以及支撑结构不良等因素产生失效，46.99% 的光伏组件在运行 25 年后失效，达到 87.11% 的光伏组件在运行 40 年后失效。

随着光伏组件技术的不断提升以及标准化工作的展开，我国光伏组件的平均寿命将稳定在 25-30 年甚至更长，出现早期失效的概率也将大大降低。

### 3.1.3 光伏组件组成材料废弃量预测模型

#### 1. 模型建立

预测光伏组件组成材料的废弃物重量，需要估算出组件报废量、每平方米中组件材料的重量、各组件技术的市场份额以及每平方米中组件的额定功率(见公式(3.27))。

$$\text{组件组成材料重量(kg)} = \frac{\text{装机容量} \times \text{组成材料重量} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \times \text{市场份额} (\%) }{\text{组件额定功率} \left( \frac{\text{Wp}}{\text{m}^2} \right)} \quad (3.27)$$

#### 2. 数据获取

##### (1) 光伏组件的成分

光伏组件技术目前有三类,即晶硅组件(c-Si)、薄膜组件、聚光太阳组件(CPV)。表 3.6 显示了 2010-2017 年我国不同组件技术市场份额占比情况,表中显示我国晶硅组件市场占比逐年上升,到 2017 年底,晶硅组件(c-Si)占比 96.5%,薄膜组件占比 3.5%,其中 CdTe 占比 2.4%、CIGS 占比 1%、a-Si 占比 0.1%<sup>[2]</sup>,未来晶硅组件仍将占光伏市场主导地位<sup>[1]</sup>。本研究选取 2017 年数据作为典型市场份额来计算组件组成材料重量。由于聚光太阳组件刚刚兴起,所占市场比重几乎为零,本研究将不涉及聚光太阳组件。

表 3.6 不同组件技术市场占比情况<sup>[1,72]</sup>

年份	c-Si	薄膜组件			
		合计	a-Si	CdTe	CIGS
2010	86.3%	13.7%			
2012	90.6%	9.4%			
2015	93%	7%	1%	4%	2%
<b>2017</b>	<b>96.5%</b>	<b>3.5%</b>	<b>0.1%</b>	<b>2.4%</b>	<b>1%</b>

对于另外两类光伏组件技术,其中都包含约 10 种组成材料,不同组件技术的组成材料重量情况如表 3.7 所示。该表数据根据美国环境保护局<sup>[73]</sup>、欧盟和美国能源部的关键材料战略<sup>[74-75]</sup>和 Ecoinvent 数据库 3.3 整理所得。该数据库具有最全面的材料成分数据,用于生成每种光伏组件技术的材料清单。

表 3.7 光伏组件各组成部分的重量情况 (kg/m<sup>2</sup>)

组成成分	c-Si	a-Si	CdTe	CIGS
玻璃	10.1	0.0358	15.2	15
EVA	1	1.24	0.6	0.9
Si	0.122	0.0002	0.05	0
Mg	0.0802	0.102	0	0.047
Te	0	0.0005	0.02	0
Ga	0	0	0	0.01
In	0	0.0009	0	0.005
Ag	0.00889	0	0	0
Al	2.54	3.24	0.015	1.51
Cu	0.113	0.07	0.5	0.05
Fe	1.47	3.1	0.2	0
Ni	0.000163	0	0	0
Cr	0	0.000044	0.003	0
Mn	0	0.000073	0	0
Zn	0	0.000029	0	0.01
Sn	0	0	0.00000023	0.01
Mo	0	0	0	0.01
Pb	0.00072	0	0.0007	0
Cd	0	0.0004	0.02	0.03
Se	0	0	0	0.01

## (2) 光伏组件的规格

光伏组件的额定功率是指在 25℃ 的温度、1000W/m<sup>2</sup> 的光强度(STC)下的标准测定功率。不同组件技术的产品在面积、重量和功率等方面具有较大的差异。

在国内市场,标准晶硅组件主要包含 60 片(6×10)和 72 片(6×12)电池片,由于 72 片规格组件运输和安装的难度比 60 片更大,晶硅组件市场主要使用 60 片规格组件。

对每种组件技术,我们选取 5 种不同型号的组件规格,取其平均值作为本研究的研究数据,如晶硅组件选取国内排名前十的 5 家光伏厂商,它们的电池片在 2017 年占全国市场约 38.2%,平均值为 164.82W/m<sup>2</sup>(见表 3.8)。表 3.8 中各厂商的组件规格数据来源于易恩孚(ENF),ENF 是光伏企业和产品信息的顶级平台,平台包含全球 48000 家光伏相关企业和 73500 个光伏产品,数据选取具有较好的可靠性。

表 3.8 光伏组件规格

组件类型	数据来源	型号	额定功率 (W <sub>p</sub> )	面积 (m <sup>2</sup> )	Wp/m <sup>2</sup>
c-Si	Ecoinvent 3.3		224	1.46	153.42
	晶科	JKM265PP-60	265	1.64	161.59
	天合	ALLMAX M Plus-300W	300	1.64	182.93
	英利	YL265PD-29b	265	1.67	158.68
	晶澳	JAP60S01-275/SC	275	1.64	167.68
	阿特斯	270P-FG	270	1.64	164.63
	平均值				<b>164.82</b>
a-Si	Ecoinvent 3.3		128	2.3	55.65
	汉能控股	HNS-ST65H	65	0.79	82.28
	first solar	FS-385	85	0.72	118.06
		FS-390	90	0.72	125
		FS-395	95	0.72	131.94
	中建材	EPV-50	50	0.94	53.19
		EPV-54	54	0.94	57.45
	平均值				<b>89.08</b>
CdTe	Ecoinvent 3.3		65	0.72	90.28
	first solar	FS CTS-270	70	0.72	97.22
		FS CTS-275	75	0.72	104.17
		FS CTS-280	80	0.72	111.11
	杭州龙焱	ASP-ST1-64	64	0.72	88.89
		ASP-S2-80	80	0.72	111.11
	平均值				<b>100.46</b>
CIGS	Ecoinvent 3.3		80	0.72	111.11
	中建材	SCG60-HV-L	60	0.81	74.07
		SCG65-HV-L	65	0.81	80.25
		SCG-GEN2-HV-F	80	0.83	96.39
	尚越光电	SY-CdF-1000E1	100	0.80	125
		SY-CdF-1050E1	105	0.80	131.25
	平均值				<b>103.01</b>

## 3.2 报废量预测结果分析

### 3.2.1 光伏组件报废量预测

将预测得到的 2019-2050 年光伏装机容量和光伏组件寿命分布概率数据代入公式(3.1), 得出 2020-2050 年光伏组件报废量。限于篇幅, 本文给出了每隔 5 年的数据(见表 3.9, 详情见各年份报废量附录)。根据表 3.9, 在 2025 年后, 光伏组件开始出现大批量失效, 2050 年的组件报

废量甚至达到 60.22GW。对于累积报废量, 2035 年前, A 和 B 阶段相同退化情景下的累积报废量差别较大, 而到 2035 年后两个阶段相同退化情景下的累积报废量基本相同, 这是由于 2035 年前, 组件报废量受 2013 年前安装的组件影响较大, 该阶段组件使用寿命较短, 报废较快。到 2035 年, 四种退化情景下的累积组件报废量将分别达到 30.66GW、29.44GW、111.77GW 和 110.93GW。到 2050 年, 累积报废量最高可达 672.98GW, 数量巨大。

表 3.9 我国光伏组件年报废量的预测结果 (GW)

年份		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
累积报废量	A1B1	0.12	1.51	8.8	30.66	84.22	209.01	435.81	
	A1B2	0.94	9.65	41.77	111.77	228.6	409.18	672.67	
	A2B1	1.08	4.08	10.93	29.44	82.55	208.51	435.72	
	A2B2	1.9	12.6	44.28	110.93	227.33	409.08	672.98	
年报废量	A1B1	0.06	0.53	2.31	6.08	14.91	32.66	53.69	
	A1B2	0.47	3.11	9.09	17.44	27.78	42.19	60.18	
	A2B1	0.33	0.81	1.89	5.46	15.13	32.83	53.73	
	A2B2	0.75	3.39	8.67	16.83	28	42.36	60.22	
不同组件类型	c-Si	A2B1	0.32	0.79	1.83	5.27	14.6	31.68	51.85
		A2B2	0.72	3.27	8.37	16.24	27.02	40.88	58.11
	a-Si	A2B1	0	0	0	0.01	0.02	0.03	0.05
		A2B2	0	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06
	CdTe	A2B1	0.01	0.02	0.05	0.13	0.36	0.79	1.29
		A2B2	0.02	0.08	0.21	0.4	0.67	1.02	1.45
	CIGS	A2B1	0	0.01	0.02	0.05	0.15	0.33	0.54
		A2B2	0.01	0.03	0.09	0.17	0.28	0.42	0.6

注: A1B2 是指 A 阶段安装的光伏组件为常规退化, B 阶段安装的光伏组件为早期退化。同样可解释其他表达。

### 3.2.2 光伏组件组成材料报废量预测

将组件报废量数据代入公式(3.27)得到光伏组件各组成材料的年报废量(见表 3.10)。结果可知, 2020 年组件材料的年报废总量最高产生  $7.2 \times 10^4 \text{t}$ ; 到 2050 年, 组件材料年报废总量将翻 80 倍, 达到  $5.8 \times 10^6 \text{t}$ , 组件材料累积废弃总量将达到  $6.5 \times 10^7 \text{t}$ 。

光伏组件的废弃物主要是玻璃, 占比 66.8%(四种退化情景下的占比情况一样), 2020 年最高将产生  $4.9 \times 10^4 \text{t}$  废弃量, 到 2050 年最高将产生  $3.9 \times 10^6 \text{t}$ 。EVA、Si、Mg、Al、Cu、Fe 废弃量分别占总重量 6.3%、0.8%、0.5%、15.7%、0.8%和 9.0%, 见图 3.6。到 2050 年, 最高将产生  $2.8 \times 10^4 \text{t}$  的 Mg、 $0.3 \times 10^4 \text{t}$  的 Ag、 $9.1 \times 10^5 \text{t}$  的 Al、 $4.7 \times 10^4 \text{t}$  的 Cu、 $5.2 \times 10^5 \text{t}$  的 Fe, 和  $4.4 \times 10^4 \text{t}$  的 Si。

稀有金属如 Te、Cd、Ga、In 等主要应用于薄膜组件中(约占总重量的 0.024%),报废量相对少,到 2050 年,最高将产生 228.1t 的 Te、463.4t 的 Cd、58.5t 的 Ga、29.8t 的 In。光伏组件中还含有 Pb 和 Se 等有毒有害金属,到 2050 年,最高将产生 263.9t 的 Pb 和 58.5t 的 Se。这些有价值金属和有毒有害金属若不得到有效处理和利用,将不仅造成资源的极大浪费,还会对环境产生污染。

表 3.10 光伏组件组成材料年报废量预测(万吨)

年份		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
总重量	A2B1	3.16	7.82	18.20	52.46	145.42	315.64	516.51
	A2B2	7.18	32.60	83.36	161.74	269.13	407.24	578.93
玻璃	A2B1	2.11	5.23	12.16	35.04	97.15	210.82	345.06
	A2B2	4.80	21.78	55.69	108.05	179.80	272.06	386.76
EVA	A2B1	0.20	0.50	1.15	3.33	9.23	20.51	32.77
	A2B2	0.46	2.07	5.29	10.26	17.08	25.84	36.73
Si	A2B1	0.02	0.06	0.14	0.40	1.10	2.38	3.90
	A2B2	0.05	0.25	0.63	1.22	2.03	3.08	4.37
Mg	A2B1	0.02	0.04	0.09	0.26	0.72	1.56	2.55
	A2B2	0.04	0.16	0.41	0.80	1.33	2.01	2.86
Ag	A2B1	0.002	0.004	0.01	0.03	0.08	0.17	0.28
	A2B2	0.004	0.02	0.05	0.09	0.15	0.22	0.31
Al	A2B1	0.50	1.23	2.85	8.22	22.78	49.44	80.90
	A2B2	1.12	5.11	13.06	25.34	42.16	63.79	90.68
Cu	A2B1	0.03	0.06	0.15	0.43	1.19	2.58	4.23
	A2B2	0.06	0.27	0.68	1.32	2.20	3.33	4.74
Fe	A2B1	0.33	0.71	1.64	4.74	13.14	28.53	46.69
	A2B2	0.65	2.95	7.54	14.62	24.33	36.81	52.33
Te	A2B1	0.0002	0.0004	0.0009	0.003	0.007	0.02	0.03
	A2B2	0.0004	0.002	0.004	0.008	0.01	0.02	0.03
Cd	A2B1	0.0003	0.0006	0.001	0.004	0.01	0.03	0.04
	A2B2	0.0006	0.003	0.007	0.01	0.02	0.03	0.05
其它	A2B1	0.0004	0.0009	0.002	0.006	0.02	0.04	0.06
	A2B2	0.0009	0.004	0.01	0.02	0.03	0.05	0.07

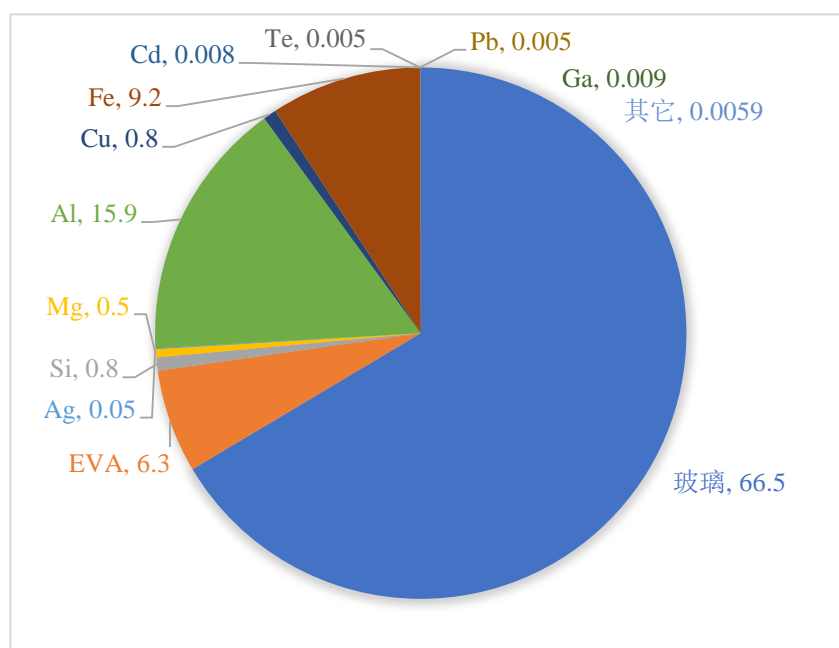


图 3.6 光伏组件各组成材料报废量占比情况

### 3.3 本章小结

本章在考虑组件质量，将组件寿命分为四种退化情景来分析光伏组件使用寿命分布，在此基础上，预测我国 2019-2050 年组件报废量及其组成材料废物量，并取得了较好的预测结果。从结果可以得知，2025 年后光伏组件报废量爆发，在 2050 年，组件报废量最高可达 60.22GW，累计报废最高可达 673GW。在四种退化情景下，到 2050 年，典型贵金属最高产生 3134.5t 的 Ag，稀有金属最高产生 228.1t 的 Te、463.4t 的 Cd、58.5t 的 Ga、29.8t 的 In，有毒有害金属最高产生 263.9t 的 Pb，Si 最高产生  $4.4 \times 10^4$ t。到 2050 年，组件材料累积废弃总量最高可达  $6.5 \times 10^7$ t，报废量巨大，因此对报废光伏组件的回收处理，建立合理有效的回收网络系统至关重要。



## 第四章 废弃光伏组件回收网络规划模型

### 4.1 报废光伏组件回收网络结构

逆向物流网络设计是决定不同设施的数量、位置和容量的主要战略问题，对供应链的盈利能力、响应能力、稳健性以及环境影响程度具有长期和重要的影响<sup>[33,48]</sup>。根据上一章分析可以看出，我国光伏组件废弃物在 2025 年后将出现大批量失效，若不及时处理将不仅造成环境的污染，还会造成资源的极大浪费。而目前国内还没有建立有关废弃光伏组件的逆向物流回收网络，因此，本章研究了针对我国光伏行业的逆向物流回收网络设计模型，希望能为政府和相关企业的废弃组件回收计划提供依据。

根据 2.1.2，在报废光伏组件逆向物流回收系统中，来自最终客户的报废组件被收集、检测、拆卸和分配，以用于组件或部件再利用、材料回收、能量回收和其它废物、废液的适当处置。在这一过程中，会涉及现场拆卸企业、回收中心、拆解处理中心、再制造中心、填埋场五大回收主体，因此本文将建立包含五大回收主体在内的四层报废光伏组件逆向物流回收网络结构，见图 4.1。

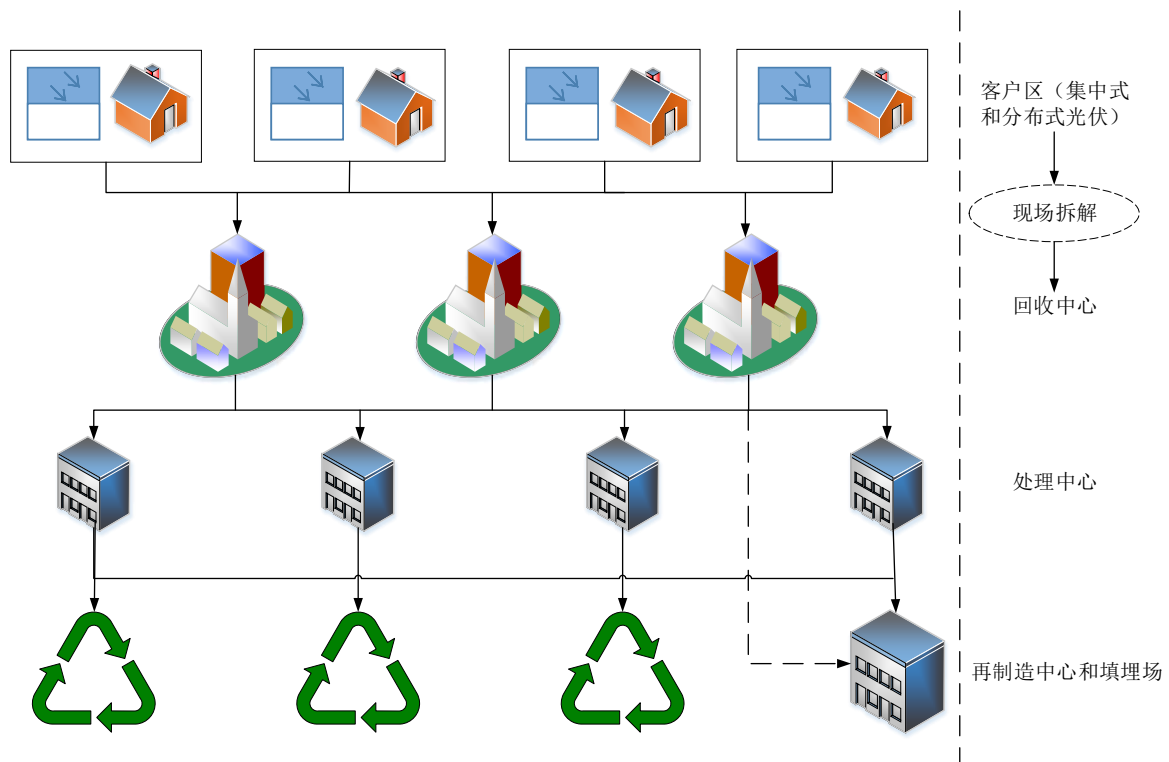


图 4.1 报废光伏组件逆向物流回收网络结构

在图 4.1 中, 由于光伏行业相较于其它行业具有较大差别, 光伏发电系统主要有大型光伏电站(集中式光伏)以及分布式光伏, 大型光伏电站占地面积大, 地理位置特殊, 远离于居民区; 分布式光伏的主要特征是投资规模很小, 一般安装在靠近用户位置, 大部分家庭可以利用自家的屋顶来安装家用太阳能光伏发电系统。同时光伏发电相较于汽车或其他电废物而言, 安装时稳固性要求高, 一般的光伏产品使用者无法对报废组件自行拆解, 因此, 便需要专业的拆解团队进行现场拆解并运送到回收收集点, 本文基于便于求解考虑, 将现场拆解活动并入到回收中心处理活动中进行处理。此时报废光伏组件逆向物流回收网络具体操作流程及各个节点所需活动如下。

客户区包括大型光伏电站用户(集中式光伏)和分布式光伏用户; 回收中心是报废光伏组件的收集地点, 由于光伏产品的特殊性, 回收中心的主要活动不仅仅包括收集客户群的报废组件, 还包括现场拆解组件, 并将收集到的报废组件进行简单检测分类后运往下一级拆解处理中心进行处理, 对于不可用报废产品直接运往填埋场; 拆解处理中心的主要活动包括对报废组件检测, 拆解零部件进行检测和分类等, 对于可利用组件或零部件运往再制造中心进行再制造再利用, 对于不可利用的废物废料运往填埋场进行填埋处理; 再制造中心的主要活动包括对拆解的组件或零部件进行进一步拆解、清洗、翻新活重新组装, 制成可用的二手组件或者零部件。

## 4.2 回收网络模型建立

### 4.2.1 问题描述

本文将建立一个以成本最小化为目标的混合整数规划模型。在逆向物流回收网络系统中(见图 4.1), 终端用户的报废组件将被回收中心派遣专业的拆解团队进行拆解并收集、检查、分解和分配, 将可用的组件运往下一级拆解处理中心进行专门的拆解、分类等, 经过拆解处理中心处理后可用的材料运往再制造中心重复利用, 不可用的材料与零件运往填埋场作废物填埋处理。在整个逆向物流回收系统中, 主要涉及四类成本, 即报废组件现场拆卸成本、运输成本、各节点的固定投资成本以及各节点中的报废组件处理成本, 因此本研究将建立整体成本最小化的混合整数规划模型, 借此求出最佳的运输规划路径及各节点的建设位置选址。

### 4.2.2 模型假设与符号说明

#### 1. 模型假设

为了简化模型, 本文作出以下基本假设:

- (1) 客户区分为集中式光伏客户区和分布式光伏客户区, 各客户区报废数量及位置已知;
- (2) 回收中心、拆解处理中心、再制造中心以及填埋场的候选地点已知;
- (3) 回收中心、拆解处理中心、再制造中心以及填埋场具有容量约束;

(4) 各设施节点的容量约束、处理成本、运输成本、回收率以及其它计算过程中的必要参数的数值不变;

(5) 各物流设施节点之间的报废组件来往过程中, 交通条件充分便利, 路况及车辆条件符合要求;

(6) 报废组件逆向物流回收网络中同一层中各设施之间相互独立, 不流通;

(7) 不同地点的同类设施节点的固定投资成本相同;

(8) 报废光伏组件分为两大类即晶硅组件、薄膜组件, 并在回收网络中回收流通。

## 2. 符号说明

### (1) 集合和索引

$C$ : 客户区集合 ( $c=1,2,\dots,C$ );

$O$ : 回收中心集合 ( $o=1,2,\dots,O$ );

$T$ : 拆解处理中心集合 ( $t=1,2,\dots,T$ );

$R$ : 再制造中心集合 ( $r=1,2,\dots,R$ );

$L$ : 填埋场集合 ( $l=1,2,\dots,L$ );

### (2) 参数

$k$ : 报废组件种类,  $k=1,2$ ;

$FO_o$ : 回收中心的固定投资成本;

$FO_t$ : 拆解处理中心的固定投资成本;

$FO_r$ : 再制造中心的固定投资成本;

$FO_l$ : 填埋场的固定投资成本;

$C_{ok}$ : 回收中心回收处理第  $k$  种报废组件的单位处理成本;

$C_{tk}$ : 拆解处理中心处理第  $k$  种报废组件的单位处理成本;

$C_{rk}$ : 再制造中心处理第  $k$  种报废组件的单位处理成本;

$C_l$ : 填埋场处理无用废物的单位处理成本;

$D_{co}$ : 客户区到回收中心的运输距离;

$D_{ot}$ : 回收中心到拆解处理中心的运输距离;

$D_{tr}$ : 拆解处理中心到再制造中心的运输距离;

$D_{tl}$ : 拆解处理中心到填埋场的运输距离;

$D_{ol}$ : 回收中心到填埋场的运输距离;

$T_{co}$ : 客户区到回收中心的单位运输成本;

$T_{ot}$ : 回收中心到拆解处理中心的单位运输成本;

$T_{tr}$ : 拆解处理中心到再制造中心的单位运输成本;

$T_{tl}$ : 拆解处理中心到填埋场的单位运输成本;

$T_{ol}$ : 回收中心到填埋场的单位运输成本;

$DI_C$ : 回收中心  $o$  到客户区  $c$  现场拆卸的单位拆卸成本;

$PV_c$ : 客户区  $c$  的组件报废量;

$PVR_k$ : 第  $k$  中光伏组件装机容量与重量转化;

$\tau$ : 报废组件回收率;

$\alpha$ : 报废组件可运往拆解处理中心进行处理的比例;

$\beta$ : 报废组件用于再制造比例;

$LO_o$ : 回收中心  $o$  回收容量下限;

$LO_t$ : 拆解处理中心  $t$  处理容量下限;

$LO_r$ : 再制造中心  $r$  处理容量下限;

$LO_l$ : 填埋场  $l$  处理容量下限;

$UP_o$ : 回收中心  $o$  回收容量上限;

$UP_t$ : 拆解处理中心  $t$  处理容量上限;

$UP_r$ : 再制造中心  $r$  处理容量上限;

$UP_l$ : 填埋场  $l$  处理容量上限;

$NU_o$ : 可建设的回收中心最大数量;

$NU_T$ : 可建设的拆解处理中心最大数量;

$NU_R$ : 可建设的再制造中心最大数量;

$NU_L$ : 可建设的填埋场最大数量;

### (3) 决策变量

$Q_{co}$ : 从客户区  $c$  到回收中心  $o$  的报废光伏组件运输量;

$Q_{ot}$ : 从回收中心  $o$  到拆解处理中心  $t$  的报废光伏组件运输量;

$Q_{tr}$ : 从拆解处理中心  $t$  到再制造中心  $r$  的报废光伏组件运输量;

$Q_{tl}$ : 从拆解处理中心  $t$  到填埋场  $l$  的废物运输量;

$Q_{ol}$ : 从回收中心  $o$  到填埋场  $l$  的废物运输量;

$$Y_o = \begin{cases} 0 & \text{建立回收中心 } o \\ 1 & \text{不建立回收中心 } o \end{cases};$$

$$Y_t = \begin{cases} 0 & \text{建立拆解处理中心 } t \\ 1 & \text{不建立拆解处理中心 } t \end{cases};$$

$$Y_r = \begin{cases} 0 & \text{建立再制造中心}r \\ 1 & \text{不建立再制造中心}r \end{cases};$$

$$Y_l = \begin{cases} 0 & \text{建立填埋场}l \\ 1 & \text{不建立填埋场}l \end{cases}.$$

### 4.2.3 模型建立

#### 1. 模型目标函数建立

考虑到目前我国报废光伏组件还没有形成规模，国内市场对报废组件的回收再制造水平参差不齐，其收益水平无法准确的描述，回收的报废组件再制造或售入二手市场产生的收益指标不适用于当做模型的目标函数。因此，本研究建立的报废光伏组件逆向回收网络模型以逆向物流成本最小化为目标函数，包括建立回收和拆解处理中心的固定投资成本，报废组件现场拆解成本，逆向物流各个节点间的运输成本，回收、拆解处理中心处理产品的处理成本。

$$\text{设施固定成本 } Z_1: \sum_O FO_o \cdot Y_o + \sum_T FO_t \cdot Y_t + \sum_R FO_r \cdot Y_r + \sum_L FO_l \cdot Y_l \quad (4.1)$$

$$\text{现场拆卸成本 } Z_2: \sum_C DI_c \cdot PV_c \cdot PVR_k \quad (4.2)$$

运输成本  $Z_3$ :

$$\begin{aligned} & \sum_C \sum_O T_{co} \cdot D_{co} \cdot Q_{co} \cdot PVR_k + \sum_O \sum_T T_{ot} \cdot D_{ot} \cdot Q_{ot} \cdot PVR_k \\ & + \sum_T \sum_R T_{tr} \cdot D_{tr} \cdot Q_{tr} \cdot PVR_k + \sum_T \sum_L T_{tl} \cdot D_{tl} \cdot Q_{tl} \cdot PVR_k \\ & + \sum_O \sum_L T_{ol} \cdot D_{ol} \cdot Q_{ol} \cdot PVR_k \end{aligned} \quad (4.3)$$

处理成本  $Z_4$ :

$$\begin{aligned} & \sum_o \sum_k \sum_c Q_{co} \cdot C_{ok} + \sum_t \sum_k \sum_o Q_{ot} \cdot C_{tk} + \sum_r \sum_k \sum_t Q_{tr} \cdot C_{rk} \\ & + \sum_l \sum_t Q_{tl} \cdot C_l \end{aligned} \quad (4.4)$$

模型目标函数如下:

$$Minz = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (4.5)$$

#### 2. 约束条件

$$LO_o \cdot Y_o \leq \sum_c Q_{co} \leq UP_o \cdot Y_o, \forall c \in C; \forall o \in O; \quad (4.6)$$

$$LO_t \cdot Y_t \leq \sum_o Q_{ot} \leq UP_t \cdot Y_t, \forall t \in T; \forall o \in O; \quad (4.7)$$

$$LO_r \cdot Y_r \leq \sum_t Q_{tr} \leq UP_r \cdot Y_r, \forall r \in R; \forall t \in T; \quad (4.8)$$

$$LO_l \cdot Y_l \leq \sum_t Q_{tl} + \sum_o Q_{ol} \leq UP_l \cdot Y_l, \forall l \in L; \forall t \in T; \quad (4.9)$$

$$\sum_c \sum_o Q_{co} = \tau \cdot \sum_c PV_c ; \quad (4.10)$$

$$\sum_o \sum_t Q_{ot} = \tau \cdot \alpha \cdot \sum_c PV_c = \alpha \cdot \sum_c \sum_o Q_{co} ; \quad (4.11)$$

$$\sum_t \sum_r Q_{tr} = \tau \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \sum_c PV_c = \alpha \cdot \beta \cdot \sum_c \sum_o Q_{co} = \beta \cdot \sum_o \sum_t Q_{ot} ; \quad (4.12)$$

$$\sum_t \sum_l Q_{tl} = \tau \cdot \alpha \cdot (1 - \beta) \cdot \sum_c PV_c ; \quad (4.13)$$

$$\sum_o \sum_l Q_{ol} = \tau \cdot (1 - \alpha) \cdot \sum_c PV_c ; \quad (4.14)$$

$$\sum_o Y_o \leq NU_o ; \quad (4.15)$$

$$\sum_T Y_t \leq NU_T ; \quad (4.16)$$

$$\sum_R Y_r \leq NU_R ; \quad (4.17)$$

$$\sum_L Y_l \leq NU_L ; \quad (4.18)$$

$$Q_{co}, Q_{ot}, Q_{tr}, Q_{tl}, Q_{ol} \geq 0, \forall c \in C, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall r \in R, \forall l \in L; \quad (4.19)$$

$$Y_o, Y_t, Y_r, Y_l \in \{0, 1\}, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall r \in R, \forall l \in L. \quad (4.20)$$

其中，式（4.5）表示模型逆向物流总成本最小；式（4.6）-（4.9）分别表示回收中心、拆解处理中心、再制造中心和填埋场四个节点回收处理量具有上下限；式（4.10）-（4.14）分别表示在组件回收率  $\tau$  水平下，客户区运往回收中心的组件报废量，在回收中心处理率  $\alpha$  水平下，回收中心运往拆解处理中心和填埋场的报废量，在拆解处理率  $\beta$  水平下，拆解处理中心分别运往再制造中心和填埋场的报废量；式（4.15）-（4.18）表示各个节点建立总数量不超过最大上限；式（4.19）表示各节点流量非负；式（4.20）表示各节点选择变量属于 0-1 变量。

### 4.3 本章小结

本章节将光伏产品客户群体需要划分以及拆解难的特征考虑到逆向回收网络规划研究中，将逆向物流网络总成本最小化作为设计网络的目标函数，来建立适用于报废光伏组件的逆向回收网络系统，这在回收网络设计研究领域是一个创新。

## 第五章 报废光伏组件回收网络规划应用研究

### 5.1 回收网络节点分布

#### 1. 客户区

光伏产品不同于其他电子产品，如手机、家电等，这些产品都为户用产品，报废产品分散，而在 2009 年之前，光伏发电系统有 95% 以上为大型光伏电站（集中式光伏）发电，报废产品较为集中。在 2009 年后，分布式光伏崛起，大力发展户用光伏，报废光伏产品较为分散，因此报废光伏组件的客户区需要分为集中式光伏客户区和分布式光伏客户区。

本章以江苏省为报废光伏组件回收网络设计的研究对象，客户区规模较大，去往同一市区的集中式光伏和分布式光伏客户区回收产生的运输成本较小，可以忽略不计，因此在计算成本时，将分布式光伏客户区与集中式光伏客户区地点统一为一个地点进行计算。为了简化研究，本文将光伏客户区划分为有限个客户区，将各个市政府作为客户区的中心，光伏组件报废量按照江苏省各市人口分布比例分配到各市。

#### 2. 回收中心

截止 2018 年底，江苏省包括 1 个副省级城市、12 个地级市、55 个市辖区、22 个县级市、19 个县，合计 96 个县级行政区划单位， $10.72 \text{ 万 km}^2$ 。如 3.2.1 节计算可知，到 2025 年后全国报废光伏组件才开始大规模爆发（A2B2 退化情景下），但总体报废量相对不是特别大，为了避免设置回收中心过量，造成资源的浪费，假设在各地级市各设置一个回收中心。

#### 3. 拆解处理中心

拆解处理中心是报废光伏组件回收网络设计中的最重要一环，是整个回收网络的核心，其工作效率的高低直接决定着整个回收体系的运营成败。拆解处理中心的建设规模需要考虑到未来一段时间内报废光伏组件的处理需求，但也要求符合实际，不能盲目建设，防止造成资源的浪费。江苏省目前有 13 个地级市，为了能够覆盖全省，本文假设在每一市建设一个拆解处理中心，即 13 个拆解处理中心。

#### 4. 再制造中心

报废光伏组件经过拆解处理中心拆解和检测，若可以继续使用，则可以直接供应给相应的光伏组件制造商，此时拆解处理中心就作为光伏组件制造商的原材料供应商或零部件供应商。光伏组件供应商作为独立经营主体，厂地理位置是既定事实，无法变动，因此本文在计算时只考虑拆解处理中心运往再制造中心以及回收中心运往再制造中心的运输成本。

根据《中国光伏行业协会章程》，截止 2018 年底光伏行业协会会员数达到 360 家左右，协

会会员单位的多晶硅总产量占 2017 年中国大陆总产量的 95% 以上，组件占 75% 以上，硅片占 80% 以上，电池片占 80% 以上，逆变器占 95% 以上，代表着中国光伏产业界的骨干力量，光伏行业协会的会员企业具有广泛代表性<sup>[76]</sup>。因此本文对行业协会 360 家企业筛选，选出江苏省内有 51 家有关光伏产品的企业，去掉行业协会及其它设备制造企业和材料企业等，并依据 2018 年中国十大光伏企业排名（包括光伏系统品牌、光伏组件品牌），本文选取出以下 11 家光伏企业作为再制造中心的候选企业（如表 5.1 所示）。

表 5.1 江苏省再制造中心候选企业

企业名称	企业地址
南京日托光伏科技股份有限公司	无锡市新吴区锡士路 20 号
常州亚玛顿股份有限公司	常州市天宁区青龙东路 639 号
正信光电科技股份有限公司	常州市金坛区直溪镇工业集中区振兴南路 1 号
江苏林洋新能源科技有限公司	南京市建邺区奥体大街 68 号 01 幢 17 层
无锡尚德太阳能电力有限公司	无锡市新吴区新华路 9 号、16 号
中节能太阳能科技（镇江）有限公司	镇江市新区北山路 9 号
天合光能股份有限公司	常州市新北区天合光伏产业园天合路 2 号
常州天马光伏电子有限公司	常州市金坛区盐港中路 69 号
英富新能源有限公司	无锡惠山经济开发区堰桥街道配套区堰丰路 8-1
协鑫新能源控股有限公司	苏州工业园区华池街时代广场 24 幢 3 楼
淮安新诺新能源有限公司	淮安市洪泽区高良涧街道渤海北路 3 号 A02 栋 8224(洪泽区电子商务产业园内)

## 5. 填埋场

根据 WEEE 指令，报废光伏组件归为家用电器类做电子废弃物处理，即报废组件可作为固体废物填埋处理。根据《江苏省行政审批危险废物经营许可证》公开显示，目前江苏省内有经营许可的填埋处置企业共计 19 家，为了方便计算，将 19 家填埋企业编号，详情见表 5.2。



表 5.2 江苏省有经营许可的填埋处置企业汇总

城市	企业名称	企业地址	年处置量/t	编号
南京	南京卓越环保科技有限公司	南京市浦口区桥林街道步月路 29 号	25000	D1
	南京绿环废物处置中心	南京市鼓楼区虎踞路 175 号	9600	D2
无锡	无锡市固废环保处置有限公司	无锡市荣巷街道青龙山对安咀 190 号	10000	D3
徐州	光大绿色环保固体废物填埋（新沂）	新沂市新安街道孔圩村金银大道 2 组	20000	D4
常州	常州市生活废弃物处理中心	江苏省常州市武进区雪堰镇浒庄村	16400	D5
苏州	光大环保（苏州）固废处置有限公司	江苏省苏州市吴中木渎七子村南侧	40000	D6
南通	江苏东江环境服务有限公司	如东沿海经济开发区洋口化学工业园	20000	D7
	上海电气南通国海环保科技有限公司（填埋）	海安县老坝港滨海新区（角斜镇）	13000	D8
	南通九洲环保科技有限公司（填埋）	南通市如皋市长江镇规划路 1 号	35000	D9
连云港	光大环保（连云港）固废处置有限公司	连云港市灌云县临港产业区燕尾新城低密度专家楼 9 号楼	20000	D10
淮安	淮安华科环保科技有限公司	淮安市淮阴区淮河东路 699 号	20000	D11
盐城	光大环保（盐城）固废处置有限公司	江苏省盐城市滨海县	30000	D12
	盐城淇岸环境科技有限公司	阜宁澳洋工业园	20000	D13
扬州	扬州杰嘉工业固废处置有限公司	江苏省仪征市青山镇龙安路	40000	D14
镇江	镇江新区固废处置股份有限公司	镇江新区大港芥麦山路 6 号	20000	D15
	江苏和合环保集团有限公司	丹阳市丹北镇后巷高桥村	80000	D16
	江苏弘成环保科技有限公司	丹阳市丹北镇胡高路倪山村	20000	D17
泰州	泰州联泰固废处置有限公司	泰兴经济开发区福泰路 1 号 1031 室	20000	D18
宿迁	光大环保（宿迁）固废处置有限公司	宿迁市宿豫区侍岭镇侍邵路 9 号	26000	D19

## 5.2 基本数据

### 1. 江苏省各客户区报废量

根据《中国电力年检（2009-2018）》<sup>[77]</sup>统计，江苏省 2008-2018 年光伏装机容量总体情况如下图 5.1 所示。

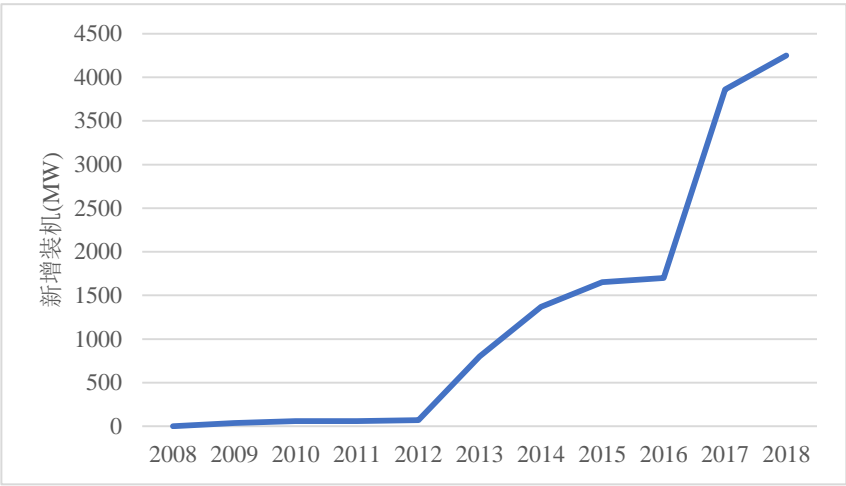


图 5.1 2008-2018 年江苏省光伏装机容量

注：2008 年光伏新增装机容量为 2008 年之前新增装机的总和。

根据《江苏统计年鉴（2016-2018 年）》<sup>[78]</sup>分析可以看出，江苏省人口近 3 年增长趋势及分布情况趋于稳定，因此本文人口分布比例选取近 3 年平均值，见下表 5.3。

表 5.3 江苏省各城市人口分布

	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
占比(%)	10.4	8.2	10.9	5.9	13.3	9.1	5.6	6.1	9.0	5.6	4.0	5.8	6.1

各客户区光伏装机容量按江苏省 13 市人口比例分布到各市，并根据 BP 神经网络模型及市场供给 A 模型（计算方式同 3.2.1 节）预测出 2020-2035 年江苏省各客户区报废量，如下表 5.4 所示。

表 5.4 2020-2035 年江苏省各客户区报废量预测量（MW）

年份	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
2020	6	4	6	3	7	5	3	3	5	3	2	3	3
2025	27	21	28	15	34	23	14	16	23	14	10	15	16
2030	70	55	73	39	89	61	38	41	60	38	27	39	41
2035	135	106	142	76	173	118	73	79	117	73	52	75	79

2. 各个节点间运输距离

在报废组件回收网络规划过程中，各节点之间的距离直接关系到运费成本，是重要的参数组成。本文以百度地图查阅的各个节点间驾车距离作为统计数据，详情见表 5.5-5.8。

表 5.5 客户中心到回收中心的运输距离 (km)

回收 客户	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
南京	5												
无锡	178.7	5											
徐州	311.4	465.3	5										
常州	127.5	55.9	412.4	5									
苏州	214.3	39.6	499.2	89.8	5								
南通	229	113.9	475.6	113.9	101.9	5							
连云港	307.1	394.4	199.9	361.2	424.7	351.1	5						
淮安	189.2	287.2	196	246.2	317.3	283.9	126.6	5					
盐城	237.6	221.9	305.5	201.7	252.1	184.4	179.2	112.9	5				
扬州	83.3	156.9	315.2	105.3	191.2	163.8	272.8	154.4	160.3	5			
镇江	66.1	129.3	340.4	77.7	163.6	164.7	305	186.6	190.1	32.9	5		
泰州	135.2	128.4	364.7	88.3	158.5	125.1	278.4	171.9	119.6	53.8	76.9	5	
宿迁	245.8	387.2	110.1	336.6	417.4	384	135.1	103.2	212.7	238	264.2	272.2	5

表 5.6 回收中心到拆解处理中心的运输距离 (km)

拆解 回收	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
南京	10												
无锡	178.7	10											
徐州	311.4	465.3	10										
常州	127.5	55.9	412.4	10									
苏州	214.3	39.6	499.2	89.8	10								
南通	229	113.9	475.6	113.9	101.9	10							
连云港	307.1	394.4	199.9	361.2	424.7	351.1	10						
淮安	189.2	287.2	196	246.2	317.3	283.9	126.6	10					
盐城	237.6	221.9	305.5	201.7	252.1	184.4	179.2	112.9	10				
扬州	83.3	156.9	315.2	105.3	191.2	163.8	272.8	154.4	160.3	10			
镇江	66.1	129.3	340.4	77.7	163.6	164.7	305	186.6	190.1	32.9	10		
泰州	135.2	128.4	364.7	88.3	158.5	125.1	278.4	171.9	119.6	53.8	76.9	10	
宿迁	245.8	387.2	110.1	336.6	417.4	384	135.1	103.2	212.7	238	264.2	272.2	10

表 5.7 拆解处理中心到再制造中心的运输距离 (km)

再 制 造 拆解	南京 日托	常州 亚玛 顿	正信 光电	江苏 林洋	无锡 尚德	中节 能	天合 光能	常州 天马	英富	协鑫	淮安 新诺
南京	34.6	134	99.3	15.8	183.6	96.5	127.7	105.4	164.2	222	155.4
无锡	204.3	66	127.1	197	12.1	126.4	70.1	113.8	33.1	56.9	307.5
徐州	316.1	436.1	408	338.8	485.8	378.6	429.9	414.1	469.8	524.1	220
常州	156.2	7.2	64.4	138	61	64.8	7.9	51.2	43	99.4	245.9
苏州	247.7	90.3	154	223.6	37.2	150.5	94.1	138	64.1	19.1	331.7
南通	278.3	146.9	211.2	250.4	113.6	146.8	112.2	194.6	123	105.3	310.3
连云港	333.2	404.9	388	326.8	409.9	359.4	398.6	397.7	389.1	456.5	176.6
淮安	205.8	288.8	260.5	199.3	315.9	231.1	282.4	266.6	295.1	354.1	43.6
盐城	286.6	213.2	223.6	271.2	221.8	167.6	206.9	215	201	260	150.9
扬州	119.4	118	81	108.5	167.7	60.5	111.8	96	149.6	206.1	144.2
镇江	111.4	85.6	63.5	86.9	135.2	24.3	79.3	58.1	117.2	173.7	170.3
泰州	182	101.3	111.7	159.3	128.8	55.7	95	103.1	108	167	204.5
宿迁	263.6	346.2	318.1	257.1	395.8	288.7	339.9	324.2	379.9	434.2	129.8

表 5.8 回收中心、拆解处理中心到填埋场的运输距离 (km)

填埋 拆解	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
南京	41.3	5.0	165.9	331.1	170.5	226.0	273.7	251.1	209.2	354.1
无锡	220.5	205.6	17.6	411.2	38.7	44.8	194.0	218.8	96.2	403.4
徐州	319.0	320.2	467.9	124.8	467.3	519.4	453.8	426.0	445.4	252.4
常州	171.2	134.1	43.6	375.0	36.1	103.7	218.4	195.9	93.7	385.9
苏州	247.2	219.2	53.8	438.2	85.6	10.8	172.8	197.6	123.2	430.3
南通	282.5	246.5	153.6	411.1	166.5	111.4	67.6	79.7	37.9	346.1
连云港	336.0	319.2	414.6	106.0	429.9	445.7	330.4	302.6	379.1	54.8
淮安	206.0	187.3	288.2	144.6	303.5	326.5	261.0	233.2	252.4	168.2
盐城	310.6	267.0	222.9	237.8	238.2	263.5	158.5	130.7	187.4	193.4
扬州	119.3	95.5	150.0	285.5	149.6	210.1	182.7	160.2	137.1	350.2
镇江	123.6	81.0	117.7	314.9	116.7	177.7	212.2	189.6	160.0	379.7
泰州	181.8	155.4	130.3	309.2	132.7	170.9	136.1	113.5	94.5	303.6
宿迁	263.0	246.2	378.1	62.5	377.7	429.4	363.8	336.0	355.3	191.3

表 5.8 (续) 回收中心、拆解处理中心到填埋场的运输距离 (km)

填埋 拆解	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19
南京	207.4	404.6	300.8	50.9	101.4	98.4	100.1	140.8	280.1
无锡	312.0	366.8	311.6	203.9	126.3	101.7	101.0	106.0	423.1
徐州	206.6	325.6	310.0	331.5	408.5	400.4	402.1	392.3	149.4
常州	275.8	349.4	289.1	142.4	67.5	42.8	42.1	85.5	368.1
苏州	338.9	408.2	333.5	228.0	153.1	128.4	127.7	132.9	447.3
南通	311.9	310.3	277.7	207.1	148.8	156.9	156.2	100.3	414.6
连云港	122.9	104.5	140.9	314.7	334.7	369.1	342.1	344.8	127.3
淮安	15.2	159.6	71.9	182.8	215.5	252.0	253.6	199.4	140.4
盐城	138.6	156.8	76.8	212.6	169.2	177.4	176.6	153.1	246.8
扬州	186.3	313.6	237.3	45.8	60.4	82.6	84.2	84.1	266.5
镇江	215.7	343.1	266.7	45.8	24.9	43.7	43.0	70.8	292.1
泰州	210.0	267.0	206.8	108.3	57.6	70.0	71.7	39.3	318.3
宿迁	116.6	236.5	171.3	240.8	288.5	310.7	312.3	302.3	28.5

对于光伏组件单位运输成本, 张志波<sup>[79]</sup>通过考虑运输重量、单价、距离、车型、人力、装车方式的变更以及运输市场淡旺季和高速收费标准等因素对光伏组件运输价格的影响, 得到的运输成本结果与实际测算结果相差不大 (如下表 5.9 所示), 数据具有参考性。因此本文采用平均数据 0.66 元/t·km 作为报废光伏组件单位运输成本, 车型选择 17.5m 半挂车型每车 36 箱, 每箱 26 块, 共计装载 936 块, 17.8t 组件, 即 LD=17.8t。同时本文假设未来一段时间内单位运输价格不变以及各节点之间的单位运输价格相同。

表 5.9 光伏组件单位运输价格 (元/t·km)

年度	2013	2014	2015	2016	平均
单位运输价格	0.64	0.66	0.70	0.62	0.66

### 3. 各节点的成本及其它参数

目前我国还没有成形的报废光伏组件回收网络, 但根据 WEEE 指令, 规定报废组件归为家用电器类强制回收处理, 因此本文参考相关电子废弃物固定资产投资成本、处理能力以及处理成本, 见表 5.10。

表 5.10 各节点固定资产投资成本、处理能力及单位处理成本

	固定资产投资成本 (万元) <sup>[80]</sup>	单位处理成本 (元/t) <sup>[48]</sup>	处理能力 (t) <sup>[81]</sup>
回收中心	60	1580	20000
拆解处理中心	216	10530	8000

光伏组件是由背板、电池片、焊带、玻璃、接线盒、光伏线等光伏元器件组成，先通过串联方式获得高电压，再并联的方式获得高电流后，通过一个二极管（防止电流回输）来输出电，这种安装方式使得光伏组件报废时的拆卸难度大大增加，根据相关资料查阅<sup>[82]</sup>，大型的兆瓦级人工费 0.2 元/W 左右，小型的分布式人工费在 0.4-0.6 元/W 之间，因此本文假设报废组件现场的单位拆解成本为 0.4 元/W。

根据 WEEE 指令，本文假设报废光伏组件全部回收，即  $\tau=100\%$ ，从回收中心运往拆解处理中心比率  $\alpha=85\%$ ，报废组件再制造率  $\beta=80\%$ ，即有 15%的报废组件从回收中心直接运往填埋场填埋处理，有 17%的报废组件从再制造中心运往填埋场填埋。

目前 250W 的光伏组件的重量一般在 19kg<sup>[83]</sup>，即组件重量为 76t/MW，假设未来光伏组件重量不变。

目前我国光伏再制造企业以及危废物填埋场对报废组件的需求较大，没有出现产能不足的问题，因此，本文假设再制造中心和填埋场的处理能力足够大。

### 5.3 回收网络设计方案

本文采用 Lingo11.0 软件编写程序来求解本文模型，本文模型是典型的混合整数规划(MILP)问题，Lingo 是专门用来求解大型线性、非线性和整数规划问题的软件，功能强大，运行速度快，计算能力强<sup>[84]</sup>。利用 Lingo 软件计算可以得到模型的最优解，包括回收和拆解处理中心的选址方案，以及各个节点之间的流量分配，其运行结果如下。

当选取 2030 年江苏省各市报废量计算时，利用 Lingo 软件求解 MILP 模计算得出报废组件回收网络最小总成本为 8.22 亿元。在最优解中：江苏省报废组件回收网络中各设施选址如下：

1. 回收中心：在常州、淮安、扬州各建一个；
2. 拆解处理中心：在常州、连云港、淮安、扬州、镇江各建一个；
3. 再制造中心：选择常州亚玛顿、中节能、淮安新诺；
4. 填埋场：选择常州市生活废弃物处理中心（D5）、淮安华科环保（D11）、扬州杰嘉工业固废处置有限公司（D14），具体的回收网络流量分配见表 5.11-表 5.15。

表 5.11 客户区到回收中心的流量分配方案 (单位: t)

	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
南京	-	-	-	1140	-	-	-	-	-	4180	-	-	-
无锡	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5548	-	-	-
徐州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
常州	-	-	-	2964	-	-	-	-	-	-	-	-	-
苏州	-	-	-	6764	-	-	-	-	-	-	-	-	-
南通	-	-	-	4636	-	-	-	-	-	721	-	-	-
连云港	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
淮安	-	-	-	-	-	-	-	2167	-	-	-	-	-
盐城	-	-	-	432	-	-	-	3116	-	-	-	-	-
扬州	-	-	-	2888	-	-	-	4128	-	2052	-	-	-
镇江	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2964	-	-	-
泰州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3116	-	-	-
宿迁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 5.12 回收中心到拆解处理中心的流量分配方案 (单位: t)

	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
南京	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
无锡	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
徐州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
常州	-	-	-	8000	-	-	8000	-	-	-	-	-	-
苏州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
南通	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
连云港	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
淮安	-	-	-	-	-	-	-	8000	-	-	-	-	-
盐城	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
扬州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8000	-	-	-
镇江	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7794	-	-
泰州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
宿迁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 5.13 拆解处理中心到再制造中心的流量分配方案 (单位: t)

	南京 日托	常州 亚玛顿	正信 光电	江苏 林洋	无锡 尚德	中节能	天合 光能	常州 天马	英富	协鑫	淮安 新诺
南京	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
无锡	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
徐州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
常州	-	12800	-	-	-	-	-	-	-	-	-
苏州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
南通	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
连云港	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
淮安	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6400
盐城	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
扬州	-	-	-	-	-	12635	-	-	-	-	-
镇江	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
泰州	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
宿迁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 5.14 回收中心到填埋场的流量分配方案 (单位: t)

	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
D1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D5	-	-	-	2824	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D11	-	-	-	-	-	-	-	1412	-	-	-	-	-
D12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2787	-	-	-
D15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



表 5.15 拆解处理中心到填埋场的流量分配方案（单位：t）

	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
D1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D5	-	-	-	3200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D11	-	-	-	-	-	-	-	1600	-	-	-	-	-
D12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3159	-	-	-
D15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## 5.4 敏感性分析

本章前面分析主要是在各项成本固定情况下得出的报废组件回收网络流量分配情况，而在实际情况中，固定资产投资成本、单位拆卸成本、单位运输成本、单位处理成本以及各节点设施处理能力会产生变化，此时的逆向回收网络设计也会存在一定的变化。为了更加贴近于实际，本节对各项参数做出变化来进行运算。

### 5.4.1 不同成本下的结果分析

#### 1. 不同固定资产投资成本下的结果分析

为了更好的描述模型，本文考虑固定资产投资成本为两种情形，一是各节点固定资产投资成本不同，将赋予回收中心固定资产投资成本为 30-100 万之间的随机分布值，拆解处理中心固定资产投资成本为 100-300 万之间的随机分布值<sup>[85]</sup>，二是各节点固定资产投资成本取值相同，即回收中心选取为 100、80、40 万元，拆解处理中心选取为 250、200、150 万元进行对比分析，具体选取的数值见表 5.16。

表 5.16 回收中心与拆解处理中心固定投资成本分布（万元）

	南京	无锡	徐州	常州	苏州	南通	连云港	淮安	盐城	扬州	镇江	泰州	宿迁
回收中心	80	70	65	65	70	60	50	55	50	45	45	40	35
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
处理中心	250	230	200	230	230	200	190	180	180	170	170	180	160
	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150

根据上述投资成本得出的仿真结果如表 5.17 所示。

表 5.17 不同固定投资成本下的回收网络结果

固定投资成本（万元）	回收中心选址	拆解处理中心选址	再制造中心选址	填埋场
所选取数值下的结果	常州	常州	常州亚玛顿	D5
	淮安	连云港	中节能	D11
	扬州	淮安	淮安新诺	D14
	-	扬州	-	-
	-	镇江	-	-

注：“所选取数值下的结果”表示固定投资成本按照表 5.16 中不同分类情形下进行仿真所得出的回收网络选址结果，如回收中心和拆解处理中心分别按照 100 万和 250 万元投资情形下计算得出的报废组件回收网络选址结果等。

根据上表显示，在其他参数不变情况下，固定投资成本的变化主要影响四类成本（固定资产投资总成本、现场拆卸成本、运输成本和处理成本）占总成本的比例变化，对于选址及流量分配影响不大。

## 2. 不同拆卸成本下的结果分析

在其他参数不变的情况下，本节将随机选取 5 种不同单位拆卸成本，来研究不同拆卸成本对回收网络选址及流量分配的影响，该 5 种单位拆卸成本为：0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 元/W，此时的报废组件回收网络设计结果如表 5.18 所示。

表 5.18 不同单位现场拆卸成本下的回收网络结果

单位拆卸成本（元/W）	回收中心选址	拆解处理中心选址	再制造中心选址	填埋场
0.2/0.3/0.4/0.5/0.6	常州	常州	常州亚玛顿	D5
	淮安	连云港	中节能	D11
	扬州	淮安	淮安新诺	D14
	-	扬州	-	-
	-	镇江	-	-

根据上表显示，在其他参数不变情况下，单位拆卸成本的变化对于选址及流量分配无影响。

## 3. 不同处理成本下的结果分析

在其他参数不变的情况下，本节对回收中心和拆解处理中心分别随机选取 5 种不同单位处理成本，来研究不同处理成本对回收网络选址及流量分配的影响。回收中心 5 种单位处理成本为：0.5、1、1.5、2、2.5 元/kg，得出的报废组件回收网络设计结果见表 5.19；拆解处理中心 5 种单位处理成本为：5、10、15、20、25 元/kg，得出的报废组件回收网络设计结果见表 5.20。

表 5.19 回收中心不同单位处理成本下的回收网络结果

单位处理成本（元/kg）	回收中心选址	拆解处理中心选址	再制造中心选址	填埋场
0.5/1/1.5/2/2.5	常州	常州	常州亚玛顿	D5
	淮安	连云港	中节能	D11
	扬州	淮安	淮安新诺	D14
	-	扬州	-	-
	-	镇江	-	-

表 5.20 拆解处理中心不同单位处理成本下的回收网络结果

单位处理成本（元/kg）	回收中心选址	拆解处理中心选址	再制造中心选址	填埋场
5/10/15/20/25	常州	常州	常州亚玛顿	D5
	淮安	连云港	中节能	D11
	扬州	淮安	淮安新诺	D14
	-	扬州	-	-
	-	镇江	-	-

根据上表显示，在其他参数不变情况下，各设施节点单位处理成本的变化对于选址及流量分配无影响。

## 4. 不同单位运输成本下的结果分析

在其他参数不变的情况下，本节将随机选取 5 种不同单位运输成本，来研究不同运输成本对回收网络选址及流量分配的影响，该 5 种单位运输成本为：0.5、0.8、1.1、1.4、1.7 元/t·km，此时的报废组件回收网络设计结果见表 5.21。

表 5.21 不同单位运输成本下的回收网络结果

单位运输成本（元/t·km）	设施类型	选址地点	设施利用率
0.5/0.8	回收中心	常州	94%
		淮安	47%
		扬州	93%
	拆解处理中心	常州	100%
		连云港	100%
		淮安	100%
		扬州	100%
		镇江	97%
	再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺	
填埋场	D5/D11/D14		
总成本（亿元）	0.5 情境下	8.21	
	0.8 情境下	8.23	
1.1/1.4	回收中心	常州	47%
		苏州	47%
		淮安	47%
		扬州	93%
	拆解处理中心	苏州	100%
		连云港	100%
		淮安	100%
		扬州	100%
		镇江	97%
	再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺、协鑫	
填埋场	D5/D6/D11/D14		
总成本（亿元）	1.1 情境下	8.25	
	1.4 情境下	8.26	
1.7	回收中心	常州	47%
		苏州	47%
		淮安	47%
		扬州	63%
		镇江	31%
	拆解处理中心	苏州	100%
		连云港	100%
		淮安	100%
		扬州	100%
		镇江	100%
	再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺、协鑫	
	填埋场	D5/D6/D11/D14/D15	
总成本（亿元）	8.28		

由上表可以看出, 单位运输成本的变化使得报废组件回收网络产生了较大的变化。

(1) 随着单位运输成本的变化, 各设施选址和需建数量都发生了变化。当单位运输成本为 0.5 和 0.8 元/t·km 时, 两者回收网络设计与在 0.66 元/t·km 下的回收网络相同, 但总成本随着单

位运输成本的升高而增大；当单位运输成本为 1.1 和 1.4 元/t·km 时，两者回收网络设计相同，但相比于在 0.5 元/t·km 情境下，回收中心需在苏州再建一个，即 4 个回收中心，拆解处理中心数量不变，但由原来的常州改为再苏州建设，再制造中心可选择地点多一个协鑫，填埋场可选择地点多一个光大环保（苏州）；当单位运输成本为 1.7 元/t·km 时，回收中心由 3 个增加到 5 个，即在原有基础上在苏州和镇江各建一个，填埋场可选地点变成 5 个，即多一个镇江新区固废处置。

（2）随着单位运输成本的变化，各设施的利用率产生了变化。由表可以看出，当单位运输成本为 0.5 或 0.8 元/t·km 时，各设施的利用率整体最高。

综上所述，报废组件的回收网络规划主要受单位运输成本影响较大，而基本不受固定投资成本、现场拆卸成本和各节点单位处理成本的影响，这三者的变化主要会对回收网络产生的总成本造成影响。

#### 5.4.2 各设施不同处理能力下的结果分析

##### 1. 回收中心不同处理能力下的结果分析

在其他参数不变情况下，本节将对回收中心设置 5 种不同的处理能力，来研究不同的处理能力对报废组件回收网络设计的影响，该 5 种处理能力为：5000t、10000t、15000t、25000t（20000t 为本文 5.3 节计算结果），计算得到的回收网络结果如表 5.22 所示。

表 5.22 回收中心不同处理能力下的回收网络结果

回收中心处理能力	设施类型	选址地点	设施利用率	总成本（亿元）	
5000t	回收中心	无锡	88%	8.26	
		常州	100%		
		苏州	100%		
		连云港	76%		
		淮安	100%		
		盐城	72%		
		扬州	100%		
		镇江	100%		
		泰州	46%		
		宿迁	100%		
	拆解处理中心	苏州	100%		
		连云港	100%		
		淮安	100%		
		镇江	100%		
		泰州	98%		
	再制造中心	常州亚玛顿、无锡尚德、中节能、淮安新诺、协鑫			
	填埋场	D3/D5/D6/D10/D11/D13/D14D15/D18/D19			

表 5.22 (续) 回收中心不同处理能力下的回收网络结果

回收中心处理能力	设施类型	选址地点	设施利用率	总成本（亿元）	
10000t	回收中心	常州	94%	8.23	
		苏州	94%		
		淮安	94%		
		扬州	94%		
		宿迁	92%		
	拆解处理中心	苏州	100%		
		连云港	100%		
		淮安	100%		
		扬州	100%		
		宿迁	97%		
再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺、协鑫				
填埋场	D5/D6/D11/D14/D19				
15000t	回收中心	常州	87%	8.22	
		苏州	63%		
		淮安	63%		
		扬州	100%		
	拆解处理中心	苏州	100%		
		连云港	100%		
		淮安	100%		
		扬州	100%		
		镇江	97%		
	再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺、协鑫			
填埋场	D5/D6/D11/D14				
25000t	回收中心	常州	75%	8.22	
		淮安	38%		
		扬州	74%		
	拆解处理中心	常州	100%		
		连云港	100%		
		淮安	100%		
		扬州	100%		
		镇江	97%		
	再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺			
	填埋场	D5/D11/D14			

根据表可以看出:

(1) 回收中心处理能力的增大使得回收中心、再制造中心和填埋场的数量减少, 拆解处理中心的数量不变, 但选址发生变化, 且回收网络总成本降低, 但当处理能力大于 15000t 时, 回收网络总成本基本保持在 8.22 亿元; 当处理能力为 10000t 时, 各设施的利用率达到相对最高。

(2) 回收中心处理能力的变化, 使得拆解处理中心选址产生变化, 但淮安选址固定不变, 选址变化主要集中在苏南地区, 即常州、苏州以及镇江地区的变化。

## 2. 拆解处理中心不同处理能力下的结果分析

在其他参数不变情况下，本节将对拆解处理中心设置 5 种不同的处理能力，来研究不同的处理能力对报废组件回收网络设计的影响，该 5 种处理能力为：6000t、7000t、9000t、10000t（8000t 为本文 5.3 节计算结果），计算得到的回收网络结果如表 5.23 所示。

表 5.23 拆解处理中心不同处理能力下回收网络结果

拆解中心处理能力	设施类型	选址地点	设施利用率	总成本（亿元）
6000t	回收中心	常州	99%	8.27
		淮安	35%	
		扬州	100%	
	拆解处理中心	无锡	80%	
		常州	100%	
		连云港	100%	
		淮安	100%	
		扬州	100%	
		镇江	100%	
		泰州	83%	
		再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺	
	填埋场	D5/D11/D14		
7000t	回收中心	常州	93%	8.24
		淮安	41%	
		扬州	100%	
	拆解处理中心	常州	100%	
		连云港	100%	
		淮安	100%	
		扬州	100%	
		镇江	100%	
		泰州	68%	
		再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺	
	填埋场	D5/D11/D14		
	9000t	回收中心	常州	
淮安			53%	
扬州			81%	
拆解处理中心		常州	89%	
		连云港	100%	
		淮安	100%	
		扬州	100%	
		镇江	53%	
再制造中心		常州亚玛顿、中节能、淮安新诺		
填埋场		D5/D11/D14		
10000t	回收中心	常州	100%	8.20
		淮安	59%	
		扬州	75%	
	拆解处理中心	常州	98%	
		连云港	100%	
		淮安	100%	
		扬州	100%	
	再制造中心	常州亚玛顿、中节能、淮安新诺		
	填埋场	D5/D11/D14		

根据表格可以看出：

(1) 拆解处理中心处理能力的增大使得回收网络总成本在减小，拆解处理中心的建址数量也在减少，回收中心、再制造中心内以及填埋场选址不变，但回收中心设施的利用率产生了变化，当拆解处理中心处理能力为 10000t 时，各设施利用率达到相对最高。

(2) 拆解处理中心处理能力的变化，使得拆解处理中心选址产生变化，但常州、连云港、淮安以及扬州的选址不变，选址变化主要集中为镇江和泰州建址数量的减少。

### 3. 报废组件回收网络的优化

综上所述，报废组件逆向回收网络的构建除了受报废量影响之外，还主要受各设施间的单位运输成本以及各设施的处理能力的影响，因此以江苏省 2030 年报废量为选取数据时，选取单位运输成本为 0.5~0.8 元/t·km，回收中心和拆解处理中心处理能力都为 10000t 时，回收网络结构的构建能得到优化。

表 5.24 报废组件回收网络优化策略

网络节点	选址地区	设施利用率	上游节点（运输量/t）	
回收中心	常州	100%	常州（2964）	南通（1400）
			盐城（2672）	泰州（2964）
	苏州	100%	苏州（6764）	南通（3236）
	淮安	100%	徐州（2844）	连云港（2888）
			淮安（3116）	盐城（1152）
	扬州	100%	南京（4180）	无锡（2704）
			泰州（3116）	-
	镇江	68%	南京（1140）	盐城（736）
扬州（2888）			镇江（2052）	
拆解处理中心	常州	100%	常州（7000）	镇江（3000）
	苏州	100%	常州（1500）	苏州（8500）
	淮安	98%	淮安（8500）	扬州（1294）
	扬州	100%	扬州（7206）	扬州（1295）
再制造中心	常州亚玛顿	-	常州（6800）	-
	中节能		扬州（6800）	镇江（4635）
	协鑫		苏州（6800）	-
	淮安新诺		淮安（6800）	-
填埋场	D5	-	常州（1500） <sup>a</sup>	常州（2000） <sup>b</sup>
	D6		苏州（1500） <sup>a</sup>	苏州（2000） <sup>b</sup>
	D11		淮安（1500） <sup>a</sup>	淮安（1959） <sup>b</sup>
	D14		扬州（1500） <sup>a</sup>	扬州（2000） <sup>b</sup>
	D15		镇江（1022） <sup>a</sup>	-
总成本/亿元	8.21			

注：1.上游节点（运输量）表示从上一节点 A 到该节点 B 之间的运输量，如常州（2964）表示从客户区常州到回收中心常州的运输量为 2964t；2.a 表示从回收中心到填埋场的运输量，b 表示从拆解处理中心到填埋场的运输量。



本文选取单位运输成本 0.66 元/t·km 为例, 各设施处理能力都为 10000t, 计算结果显示回收网络的总成本降低了 100 万元, 各设施节点的利用率得到了提高, 回收中心平均利用率从 78% 上升到 93.6%, 回收中心选址为: 常州、苏州、淮安、扬州、镇江; 拆解处理中心选址为: 常州、苏州、淮安、扬州; 再制造中心可选择: 常州亚玛顿、中节能、协鑫、淮安新诺; 填埋场可选择: 常州市生活废弃物处理中心、光大环保(苏州)、淮安新华环保、扬州杰嘉工业、镇江新区固废处置股份有限公司。详情见表 5.24。

## 5.5 本章小结

本章节以江苏省为实证研究对象, 采用 MILP 模型对其进行回收网络规划, 并采用了 Lingo11.0 求解了 MILP 模型, 计算给出江苏省报废光伏组件回收网络规划的选址以及流量方案, 并对固定投资成本、现场拆卸成本、运输成本、各节点处理成本以及处理能力进行了敏感性分析。在规划设计过程中, 本研究充分考虑了光伏产品不同于手机、“四机一脑”等产品的回收网络规划的特点, 将光伏组件回收客户区分为集中式与分布式两种, 并将现场拆解考虑到回收网络规划中去, 从而得出适用于报废光伏组件的回收网络系统。

## 第六章 结论与展望

在政策与市场双重作用下，中国光伏发电得到迅猛发展，而当光伏组件使用寿命到期时，报废组件的回收处理将成为重大问题。目前国外如欧盟、美国、日本等国家已经出台相关政策促使报废光伏组件的有效回收，而我国光伏行业起步较晚，目前还未形成规模化组件报废，但当组件寿命到期时，大量的报废组件将对环境产生污染，并造成资源的极大浪费，因此迫切需要规划出合理有效的报废组件逆向回收网络系统，对报废光伏组件进行回收处理。本文基于此，对报废组件回收网络规划进行深入研究，得出如下结论：

（1）创新性的在考虑组件使用寿命基础上对组件报废量进行预测。我国光伏组件质量受国家政策影响，可以分成两个阶段，2013 年之前为产业发展阶段，该阶段的组件质量参差不齐，大多数的光伏组件都没有达到 25 年寿命预期便报废；在 2013 年后为产业稳定阶段，该阶段光伏产业走向标准化，新的光伏制造项目电池转换效率统一规定，光伏产品质量得到保证，大部分的光伏组件都能达到 25~30 年的理想寿命预期。

因此，本文创新性的考虑光伏组件质量问题，将组件寿命分为四种退化情景，构建预测模型对光伏组件报废量及其组成材料重量进行预测。

（2）提出了一个符合光伏组件特制的报废组件回收网络模型。该模型将客户区分为集中式光伏与分布式光伏两种，并将现场拆解活动计入到模型目标函数中去，使得模型求解更加贴近于实际。

（3）以江苏省为例进行应用研究。江苏省作为光伏装机大省，连续位列全国新增装机前列，因此以江苏省为例设计的报废组件回收网络系统具有一定的普适性，可以为其他城市做相关逆向回收网络规划提供参考。

本文的研究还存在一定的局限性，希望未来能够得到进一步的深入研究。

（1）本文虽然考虑了组件使用寿命变化来预测光伏组件报废量，但仍然存在一定的局限性：光伏组件寿命分布需进一步精确，由于未考虑到自然灾害、人为破坏等不确定因素，威布尔分布的参数设置不够精确；不同组件类型的市场份额不是固定不变值，会随着技术的进步而产生变化；光伏组件的技术规格及各组成材料重量不是固定不变值，会根据组件类型、型号的差异及技术的改进而产生变化。

（2）我国的废旧光伏组件还处于萌芽阶段，因此在废旧光伏组件逆向物流网络设计的研究中，采用的数据大多是预测生成的数据。因此，还有必要提高数据的精确性。

（3）本文在设计报废组件逆向回收网络模型过程中，由于条件有限，并没有考虑到多批次运输，因此未来需要进一步的改善。

## 参考文献

- [1] 王世江,江华,金艳梅,等.中国光伏产业发展路线图(2018年版)[R],2019.  
[http://www.chinapv.org.cn/road\\_map/702.html](http://www.chinapv.org.cn/road_map/702.html)
- [2] 韩华明.25年后中国面临光伏组件回收潮[N].中国有色金属报.2014-12-18(004).
- [3] 光伏制造.光伏废弃物回收将成为新兴市场—光伏未来十年的发展很大程度上仍取决于政府出台的政策[EB/OL].2012.<http://www.eepw.com.cn/article/128315.htm>
- [4] 王淑娟.如何计算光伏项目的占地面积[EB/OL].2017.  
<https://news.solarbe.com/201703/13/110074.html>
- [5] 吴翠姑.光伏组件回收及再利用标准工作组成立大会暨工作会议—晶体硅光伏组件分解回收关键技术研究进展[EB/OL].2018.<https://mp.weixin.qq.com/s/XkRjDQmFZtxGxdmGNKxuhQ>
- [6] 陈东坡.废旧光伏组件回收再利用需重点关注[J].中国投资.2017(03):72-73.
- [7] 张映斌.光伏组件回收及再利用标准工作组成立大会暨工作会议—天合光能光伏组件回收研究进展[EB/OL].2018.<https://mp.weixin.qq.com/s/XkRjDQmFZtxGxdmGNKxuhQ>
- [8] Solarbe.光伏废弃物回收将成为新兴市场[EB/OL].2012.  
<http://guangfu.bjx.com.cn/news/20120118/337594.shtml>
- [9] PV CYCLE. Annual Report 2015 - PV CYCLE Association[EB/OL].2016.  
[http://c1482.paas1.fra.modxcloud.com/ebooks\\_PVCYCLE/2015/AR2015/](http://c1482.paas1.fra.modxcloud.com/ebooks_PVCYCLE/2015/AR2015/)
- [10] 2012/19/EU. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive [S]. The European Parliament and of the Council,2012.
- [11] 吴洪宽.光伏产业链的最后一个行业—光伏电站回收业[J].城市建设理论研究(电子版),2017(02):151.
- [12] PV CYCLE.VEOLIA REMPORTE LE PREMIER CONTRAT DE RECYCLAGE DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES USAGÉS EN FRANCE[EB/OL].2017.  
<http://www.pvcycle.org/press/veolia-remporte-le-premier-contrat-de-recyclage-de-panneaux-photovoltaïques-usages-en-france/>
- [13] 张雅堃.家电产品保有量/报废量预测及回收网络规划[D].合肥工业大学,2015.
- [14] Simon W., Noel D., Matt C., et al. Waste from electrical and electronic equipment[J]. Washington D.C., U.S., Environmental Protection Agency, 2001:95-96.
- [15] 刘小丽,杨建新,王如松.中国主要电子废物产生量估算[J].中国人口·资源与环境,2005(05):117-121.

- [16] 梁晓辉,李光明,贺文智,等.中国电子产品废弃量预测[J].环境污染与防治,2009,31(07):94-96+103.
- [17] Yu J , Williams E , Ju M , et al. Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(9):3232-3237.
- [18] 李海红,巩雪松,同帆.多元线性回归预测模型在农村生活垃圾产量预测中的应用[J].西南农业学报,2010,23(04):1325-1328.
- [19] Yang Yang, Jian Zhang, Weizhe Feng. A prediction on electronic waste resource with time series model[P]. Computer Application and System Modeling (ICCA SM), 2010 International Conference on,2010.
- [20] 李劲,王华.电子产品废弃量预测及优化处置量[J].中北大学学报(自然科学版),2011,32(06):780-785.
- [21] JIEXIAN HE. Study on Prediction of the Waste Quantities of Household Appliances in Guangdong Province[C]. 北京欣永顺文化传播有限公司.Proceedings of 2013 International Conference on Frontiers of Energy,Environmental Materials and Civil Engineering(FEEMCE 2013). 北京欣永顺文化传播有限公司:北京欣永顺文化传播有限公司,2013:824-830.
- [22] Qi-yun LIAO. Construction Waste Output Forecast and Analysis Based on Gray Prediction Method in Urban Chongqing[C]. Advanced Science and Industry Research Center.Proceedings of 2014 International Conference on Energy, Environment and Materials Engineering(EEME 2014).Advanced Science and Industry Research Center:Science and Engineering Research Center,2014:258-264.
- [23] 刘志峰,薛雅琼,黄海鸿.我国大陆地区电器电子产品报废量预测研究[J].环境科学学报,2016,36(05):1875-1882.
- [24] 宋广翰,孟雯,宋庆彬,等.我国打印机废弃量估算研究[J].环境工程,2016,34(07):129-133.
- [25] Zheng Liu,Haiyan Fu,Aili Yang,Huiyan Cheng. Combined weight-varying model for production prediction of residential solid waste: a case study of Xiamen[P]. Proceedings of the 2016 International Conference on Economy, Management and Education Technology,2016.
- [26] 王文梅,刘丹.一种城市生活垃圾产生量预测的改进方法[J].四川环境,2005(01):106-108.
- [27] 王峰.我国废 CRT 含铅玻璃回收量预测研究[D].天津理工大学,2016.
- [28] 刘思峰,杨英杰,吴利丰.灰色系统理论及其应用(第七版)[M].北京:科学出版社,2017.
- [29] Annarita Paiano. Photovoltaic waste assessment in Italy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,41:99-112.
- [30] Santos JD, Alonso-García MC. Projection of the photovoltaic waste in Spain until 2050[J].

Journal of Cleaner Production, 2018,196:1613-1628.

[31] Adriana Dom ínguez, Geyer R . Photovoltaic waste assessment in Mexico[J]. Resources Conservation & Recycling, 2017, 127:29-41.

[32] Adriana Dom ínguez,Roland Geyer. Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America[J]. Renewable Energy,2019,133:1-13.

[33] Behnam Vahdani,Mahdi Naderi-Beni. A mathematical programming model for recycling network design under uncertainty: an interval-stochastic robust optimization model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,73(5-8):1057-1071.

[34] Majid Ramezani,Mahdi Bashiri,Reza Tavakkoli-Moghaddam. A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level[J]. Applied Mathematical Modelling,2013,37(1-2):328-344.

[35] Vildan Özkır,Hüseyin Başlıgil. Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment[J]. Journal of Cleaner Production,2013,41:114-125.

[36] Fu Chen,Baodan Yang,Wangyuan Zhang, et al. Enhanced recycling network for spent e-bicycle batteries: A case study in Xuzhou, China[J]. Waste Management,2017,60:660-665.

[37] Jianquan Guo,Xinxin Liu,Jungbok Jo. Dynamic joint construction and optimal operation strategy of multi-period reverse logistics network: a case study of Shanghai apparel E-commerce enterprises[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2017,28(3):819-831.

[38] Kannan Govindan,Hamed Soleimani,Devika Kannan. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future[J]. European Journal of Operational Research,2015,240(3):603-626.

[39] Jin Wei. The Study of Recycling System of Waste Household Appliances Based on Network Information Platform[C]. 乌克兰国立技术大学、东京理科大学、同济大学.Proceedings of the 2018 First International Conference on Environment Prevention and Pollution Control Technology (EPPCT 2018).乌克兰国立技术大学、东京理科大学、同济大学:International Conference on Humanities and Social Science Research,2018:1291-1298.

[40] 徐立伟.基于逆向物流的制造商库存控制研究[D].沈阳大学,2014.

[41] Ravi, V. Reverse Logistics Operations in Automobile Industry: A Case Study Using SAP-LAP Approach[J]. Global Journal of Flexible Systems Management, 2014, 15(4):295-303.

[42] Shameem, Ahmed, Shamsuddin, et al. A comparative decision-making model for sustainable end-of-life vehicle management alternative selection using AHP and extent analysis method on fuzzy AHP[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2016:83-97.

- [43] Zheng Zhang. Robust Optimization Study of Recycling Network for Electronic Waste[C]. Information Engineering Research Institute, USA.Proceedings of 2014 3rd International Conference on Micro Nano Devices,Structure and Computing Systems(MNDSCS 2014).Information Engineering Research Institute, USA:智能信息技术应用学会,2014:286-291.
- [44] 蒙培富.汽车零部件逆向物流网络优化设计[D].上海师范大学, 2014.
- [45] 王钰雷.汽车再制造逆向物流网络优化研究[D].吉林大学,2014.
- [46] 刘艳红.北京市废旧汽车逆向物流系统优化分析[J].企业改革与管理,2016(08):199.
- [47] 严南南,李明.基于低碳的报废汽车逆向物流网络选址问题研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(5):180-184.
- [48] Hao Yu,Wei Deng Solvang. A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,87(9-12):2693-2711.
- [49] Eray Demirel,Neslihan Demirel,Hadi Gökçen. A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey[J]. Journal of Cleaner Production,2016,112:2101-2113.
- [50] Alumur S A , Nickel S , Saldanha-Da-Gama F , et al. Multi-period reverse logistics network design[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 220(1):67-78.
- [51] Luu Quoc Dat,Doan Thi Truc Linh,Shuo-Yan Chou,Vincent F. Yu. Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products[J]. Expert Systems With Applications,2012,39(7):6380-6387.
- [52] Ahmed Alshamsi,Ali Diabat. A reverse logistics network design[J]. Journal of Manufacturing Systems,2015,37:589-598.
- [53] Dawei Liu. Network site optimization of reverse logistics for E-commerce based on genetic algorithm[J]. Neural Computing and Applications,2014,25(1):67-71.
- [54] Yan LI, Hailong LI, Ge WANG. et al. Study on the optimal deployment for Photovoltaic components recycle in China[J]. Energy Procedia, 2019(158):4298-4303.
- [55] Xiaoyong Pan, Yongliang Liu,Jiang Wu,et al. Research on the Model of Reverse Logistics Networks Planning Based on Recycling Waste Household Appliances[J].Advanced Materials Research,2014.5:3926-3929.
- [56] Kumar B M , Saravanan R . Network Design for Reverse Logistics – A Case of Recycling Used Truck Tires[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 592-594:2677-2688.
- [57] Mirdar Harijani A , Mansour S , Karimi B , et al. Multi-period sustainable and integrated

- recycling network for municipal solid waste – A case study in Tehran[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151(05):96-108.
- [58] 江华.中国光伏产业发展概述[R].中国光伏行业协会（CPIA）,2018.
- [59] PV CYCLE. PV Cycle-how the system works\_ EN[EB/OL],2018. <http://www.pvcycle.org/>.
- [60] PV CYCLE. 2016 年 PV Cycle 年报[EB/OL],2016.<http://www.pvcycle.org/>.
- [61] 董长虹.Matlab 神经网络与应用[M].北京:国防工业出版社,2015:66-104.
- [62] 蒋仁言.威布尔模型族—特性、参数估计及应用[M].北京:科学出版社,1998.
- [63] Keshav Parajuly,Komal Habib,Gang Liu. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Denmark: Flows, quantities and management[J]. Resources, Conservation & Recycling,2017,123(08):85-92.
- [64] 郭学益,张婧熙,严康,等.中国废旧电脑产生量及其金属存量分析研究[J].中国环境科学,2017,37(09):3464-3472.
- [65] Kuitche, Joseph M. Statistical Lifetime Prediction for Photovoltaic Modules[EB/OL], 2010. <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvrw2010>.
- [66] 王喜炜,白建波,宋昊,等.光伏组件加速老化试验可靠性及其寿命分布研究[J].可再生能源,2017,35(05):675-680.
- [67] Pilar Espinet-González, Algora C , Neftalí Núñez, et al. Evaluation of the reliability of commercial concentrator triple-junction solar cells by means of accelerated life tests (ALT)[C]. American Institute of Physics, 2013.
- [68] Kumar, Suresh, Sarkara, et al. Design for reliability with Weibull analysis for photovoltaic modules[J]. International Journal of Current Engineering and Technology , 2013,3 (1):129-134.
- [69] 余荣斌.基于性能退化的光伏组件服役可靠性评估方法研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [70] 吕瑞瑞,张增明,彭丽霞,等.一种光伏背板寿命推算的研究[J].合成材料老化与应用,2012,41(01):20-23.
- [71] International Energy Agency. International renewable energy agency. In: End-of-Life Management. Solar Photovoltaic Panels[R]. T12-06: 2016,2016.
- [72] 王世江.当代多晶硅产业发展概论[M].北京:人民邮电出版社,2015:13-17.
- [73] U.S. Environmental Protection Agency(EPA). Regulatory Information by Topic: Toxics Substances[EB/OL], 2016.<https://www.epa.gov>.
- [74] Ad-hoc Working Group, European Commission. Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials, Technical Report[EB/OL], 2010. <http://ec.europa.eu>.

- [75] U.S. Department of Energy(DOE). Critical Material Strategy[EB/OL], 2010-12.  
<http://www.doc88.com/p-9029715669697.html>.
- [76] CPIA.中国光伏行业协会[EB/OL],2019.[http://www.chinapv.org.cn/association\\_profile.html](http://www.chinapv.org.cn/association_profile.html).
- [77] 《中国电力年鉴》编辑委员会.中国电力年鉴[M].北京,中国电力出版社,2008-2018.
- [78] 江苏省统计局.江苏统计年鉴[M].北京,中国统计出版社,2016-2018.
- [79] 张志波.关于光伏项目组件物流运输市场的价格分析[J].中国市场,2019(24):168-169.
- [80] 马伟华.淮安市废旧家电回收物流网络设计研究[D].南京理工大学,2014.
- [81] 江苏省生态环境厅.江苏省危险废物经营许可证情况表[EB/OL],2018.12.  
[http://hbt.jiangsu.gov.cn/art/2019/3/11/art\\_73975\\_8258915.html](http://hbt.jiangsu.gov.cn/art/2019/3/11/art_73975_8258915.html).
- [82] 土流网.农村安装的光伏板价格多少钱一平方?[EB/OL],2018.  
<https://www.tuliu.com/read-76937.html>.
- [83] 户用光伏网.一块光伏组件尺寸多大、重量几何?[EB/OL],2018.  
<http://guangfu.bjx.com.cn/news/20180731/917088.shtml>.
- [84] 袁新生,邵大宏,郁时炼,等,LINGO 和 Excel 在数学建模中的应用(第一版)[M].北京,科学出版社,2007.
- [85] Cameron C, Faircloth, Kristen H, et al. The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019,143(04):260-272.



## 致 谢

从 2017 年 9 月至今的两年多研究生生涯，南航给我带来了许多美好的回忆，我也收获了很多成长。

回首我的研究生之旅，首先要感谢的是我的导师张钦教授，从我的毕业论文选题、构思到最终成稿，每个阶段都离不开张老师的督促和悉心指导。张老师的严谨治学和丰富的实践经验，使我受益匪浅，终生难忘，在此向张老师表示衷心的感谢，谢谢张老师。

其次，我要感谢的是经济与管理学院能源软科学研究中心各位老师和同学以及 312 教研室的所有师兄师姐，即使研究的方向会有所不同，但各位老师和同学孜孜不倦的科研精神，给予了我研究生涯学习之路很大的鼓励，非常感谢各位老师和同学。

最后，我要特别感谢我的男朋友葛文兴和我的家人，在我遇到学习和生活上的困难时，他们都是我的坚强后盾，不断鼓励我、帮助我，让我能够坚持不放弃，非常感谢你们。

研究生涯即将结束，即使这一阶段的学习之旅将要结束，但我的学习之路不会结束，学习之火不断。最后，希望南航能够越走越好，越来越棒，祝各位同门，前程似锦。

## 在学期间的研究成果及发表的学术论文

### 攻读硕士学位期间发表（录用）论文情况

1. 张钦,傅丽芝.中国光伏组件报废量的预测[J].环境工程,2020（1-3）.

### 攻读硕士学位期间参加科研项目情况

1. 无锡市阿曼达机电有限公司内部管理诊断优化项目，项目参与人

## 附 录

2020-2050 年光伏组件报废量 (GW)												
年份	年报废量 (A1B)		年报废量 (A2B)		不同组件类型 (A2B)							
					c-Si		a-Si		CdTe		CIGS	
	A1B1	A1B2	A2B1	A2B2	A2B1	A2B2	A2B1	A2B2	A2B1	A2B2	A2B1	A2B2
2020	0.06	0.47	0.33	0.75	0.32	0.72	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01
2021	0.09	0.77	0.41	1.09	0.39	1.05	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01
2022	0.15	0.80	0.50	1.52	0.48	1.46	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.02
2023	0.24	1.69	0.59	2.04	0.57	1.97	0.00	0.00	0.01	0.05	0.01	0.02
2024	0.36	2.33	0.70	2.66	0.67	2.57	0.00	0.00	0.02	0.06	0.01	0.03
2025	0.53	3.11	0.81	3.39	0.79	3.27	0.00	0.00	0.02	0.08	0.01	0.03
2026	0.75	4.03	0.95	4.23	0.92	4.08	0.00	0.00	0.02	0.10	0.01	0.04
2027	1.03	5.09	1.11	5.17	1.08	4.99	0.00	0.01	0.03	0.12	0.01	0.05
2028	1.39	6.29	1.32	6.22	1.27	6.01	0.00	0.01	0.03	0.15	0.01	0.06
2029	1.81	7.63	1.57	7.39	1.51	7.13	0.00	0.01	0.04	0.18	0.02	0.07
2030	2.31	9.09	1.89	8.67	1.83	8.37	0.00	0.01	0.05	0.21	0.02	0.09
2031	2.88	10.64	2.31	10.07	2.23	9.72	0.00	0.01	0.06	0.24	0.02	0.10
2032	3.53	12.27	2.84	11.58	2.74	11.18	0.00	0.01	0.07	0.28	0.03	0.12
2033	4.27	13.96	3.52	13.21	3.40	12.75	0.00	0.01	0.08	0.32	0.04	0.13
2034	5.10	15.68	4.38	14.96	4.23	14.44	0.00	0.01	0.11	0.36	0.04	0.15
2035	6.08	17.44	5.46	16.83	5.27	16.24	0.01	0.02	0.13	0.40	0.05	0.17
2036	7.23	19.25	6.78	18.81	6.54	18.16	0.01	0.02	0.16	0.45	0.07	0.19
2037	8.63	21.18	8.38	20.92	8.08	20.19	0.01	0.02	0.20	0.50	0.08	0.21
2038	10.35	23.21	10.29	23.15	9.93	22.34	0.01	0.02	0.25	0.56	0.10	0.23
2039	12.43	25.41	12.53	25.51	12.09	24.62	0.01	0.03	0.30	0.61	0.13	0.26
2040	14.91	27.78	15.13	28.00	14.60	27.02	0.02	0.03	0.36	0.67	0.15	0.28
2041	17.80	30.34	18.07	30.61	17.44	29.53	0.02	0.03	0.43	0.73	0.18	0.31
2042	21.07	33.07	21.35	33.34	20.60	32.18	0.02	0.03	0.51	0.80	0.21	0.33
2043	24.68	35.97	24.93	36.22	24.06	34.95	0.02	0.04	0.60	0.87	0.25	0.36
2044	28.57	39.01	28.78	39.22	27.77	37.85	0.03	0.04	0.69	0.94	0.29	0.39
2045	32.66	42.19	32.83	42.36	31.68	40.88	0.03	0.04	0.79	1.02	0.33	0.42
2046	36.89	45.51	37.02	45.64	35.73	44.04	0.04	0.05	0.89	1.10	0.37	0.46
2047	41.17	48.96	41.27	49.06	39.83	47.34	0.04	0.05	0.99	1.18	0.41	0.49
2048	45.43	52.55	45.51	52.63	43.92	50.79	0.05	0.05	1.09	1.26	0.46	0.53
2049	49.62	56.29	49.68	56.35	47.94	54.37	0.05	0.06	1.19	1.35	0.50	0.56
2050	53.69	60.18	53.73	60.22	51.85	58.11	0.05	0.06	1.29	1.45	0.54	0.60