

中图分类号：X24

单位代码：11414  
学号：2013216535

# 硕士专业学位论文

题目 汽柴油全生命周期碳排放计算

工程领域 化学工程

研究方向 油气加工工艺与工程

工程硕士生 程冬茹

指导教师 刘坚教授

现场导师 刘灵丽教授级高级工程师

入学时间：2013年9月 论文完成时间：2016年5月

## 硕士专业学位论文独创性声明

郑重声明：本硕士专业学位论文是作者个人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他个人和集体已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得中国石油大学或者其它单位的学位或证书所使用过的材料。对本研究做出贡献的个人和集体，均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。作者和导师完全意识到本声明产生的法律后果并承担相应责任。

作者签名：程冬茹 日期：2016.5.30

导师签名：刘军 日期：2016.5.30

## 硕士专业学位论文授权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解中国石油大学（北京）学位论文版权使用的有关规定，使用方式包括但不限于：学校有权保留并向有关部门和机构送交学位论文的复印件和电子版；允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文；可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索。

本学位论文属于保密范围，保密期限0年，解密后适用本授权书。

本学位论文作者如需公开出版学位论文的部分或全部内容，必须征得导师书面同意，且须以中国石油大学（北京）为第一署名单位。

作者签名：程冬茹 日期：2016.5.30

导师签名：刘军 日期：2016.5.30

## 摘 要

近年来，全球变暖引发的气候问题日益凸显，与之相应的环保法规也日益严苛，碳税和碳标签的发展已成为低碳经济发展的主要趋势。道路交通运输燃料燃烧产生的碳排放作为温室气体排放的主要来源之一，对与之相关的汽车行业和炼油企业都提出了严峻的碳减排挑战。汽车排放低碳化、炼油生产碳排放责任制已成为发展趋势，积极做好燃料碳排放量化工作是适应低碳发展的必然要求。

本文在全生命周期理论的基础上对以石油为原料的汽柴油产品进行碳排放量化计算，将汽柴油产品的生命周期划分为原油开采、原油运输、炼厂生产、油品运输和汽车使用五个阶段，并结合各阶段碳排放特点确定各阶段的碳排放计算方法。重点研究炼厂生产阶段碳排放计算方法和模型，通过分析汽柴油产品在炼厂生产阶段碳排放特点，采用作业成本法进行产品碳排放计算，并结合不同炼厂生产实例，计算不同品种牌号汽柴油产品在炼厂生产阶段的碳排放情况，分析后得出结论：在炼厂生产阶段，加工工艺和流程不同的炼厂生产的汽柴油产品碳排放不同；对于同一炼厂，生产汽油单位碳排放比柴油高；对于汽油，生产 95# 单位碳排放一般比 92# 高；对于柴油，生产普通柴油单位碳排放比车用柴油高。最后对典型炼厂汽柴油产品进行全生命周期碳排放分析，并分析各阶段碳排放数据结果。

本文所建立的汽柴油全生命周期碳排放计算模型可针对不同炼厂加工路线，测算不同品种牌号汽柴油全生命周期碳排放，为油品节能环保分析提供依据，为炼厂选择不同加工路线提供碳排放依据，也为汽柴油产品碳税征收及碳标签的确定提供支持。

**关键词：汽柴油；全生命周期；碳排放；作业成本法**

## Carbon Emissions Calculation of Gasoline and Diesel Fuel Based on Life Cycle Assessment

### **ABSTRACT**

In recent years, climate change caused by global warming have become increasingly prominent. Correspondingly, environmental regulations are increasingly stringent. Improvement and development of carbon taxes and carbon labeling has been the main trend of low-carbon economy. As one of the major source of greenhouse gas emissions, carbon emissions of fuel combustion from road transport pose a severe challenge to the automotive industry and refineries. Low carbon emissions of vehicle and carbon responsibility system for refineries has become a trend. To adapt to low-carbon development, it is a necessary requirement to do well of the calculation of carbon emissions from fuel.

Firstly, on the basis of Life Cycle Assessment, the paper divides the full life cycle of gasoline and diesel into five stages to calculate the carbon emissions from fuel, including oil exploration, oil transportation, fuel production, fuel transportation and car use. Taking into account of the characteristics of each stage, then establish the methods and models of every stages to calculate carbon emissions. Secondly, focus on researching the calculation methods and model of the producing stage. By analyzing the characteristics of carbon emissions in this stage, the method of emissions calculation is determined based on activity-based costing method. And then to calculate carbon emissions from the refinery production stage of gasoline and diesel products with different grades and different quality. With the analysis, the paper concludes that: in refinery production stage, gasoline and diesel from different refinery has different carbon emissions; for the same refinery, gasoline release more carbon emissions than diesel; as for gasoline, carbon emissions from gasoline 95# is generally higher than gasoline 92#; as for diesel, regular diesel produces more carbon emissions than the diesel using in vehicles. Finally, based on life cycle analysis , the paper calculates the carbon emissions of gasoline and diesel from selected refineries, and then make comparison and analysis of various stages.

In summary, the results of the paper can be used to estimate gasoline and diesel from different refinery processing routes as well as different grades of different quality of gasoline and diesel products. In order to provide the basis data for energy saving of oil products. And it also can be used for refineries to choose different processing routes

## ABSTRACT

---

by providing carbon emissions data, but also can prepare for the gasoline and diesel products to determine carbon tax and carbon labels.

**Key Words: Gasoline and Diesel Fuel; Life Cycle Assessment; Carbon Emissions; Activity-Based Costing**

## 目 录

硕士专业学位论文独创性声明 .....	I
硕士专业学位论文授权使用授权书 .....	I
摘 要 .....	II
<b>ABSTRACT</b> .....	III
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	3
1.2 国内外研究进展 .....	4
1.2.1 国外研究进展 .....	4
1.2.2 国内研究进展 .....	5
1.2.3 综述小结 .....	6
1.3 研究内容、创新点、研究方法和技术路线 .....	7
1.3.1 研究内容 .....	7
1.3.2 创新点 .....	8
1.3.3 研究框架 .....	9
第 2 章 碳排放计算基本方法和理论 .....	10
2.1 车用燃料全生命周期评价理论 .....	10
2.2 碳排放计算基本方法 .....	10
2.2.1 温室气体种类 .....	10
2.2.2 碳排放基本计算方法 .....	11
2.3 国内外碳排放量化相关标准 .....	12
2.3.1 国外碳排放量化相关标准 .....	12
2.3.2 国内碳排放量化标准 .....	13
第 3 章 汽柴油各生命周期阶段碳排放算法分析 .....	14
3.1 系统边界及功能单位的确定 .....	14
3.1.1 系统边界 .....	14
3.1.2 功能单位的设定 .....	15
3.2 汽柴油生命周期各阶段计算模型 .....	15
3.2.1 前提条件 .....	15
3.2.2 WTT 阶段碳排放计算模型 .....	15

## 目 录

3.2.3	TTW 阶段碳排放计算模型 .....	18
3.2.4	全生命周期碳排放计算模型 .....	18
3.3	WTW 计算方法分析 .....	19
3.3.1	WTT 阶段计算方法分析 .....	19
3.3.2	TTW 阶段计算方法分析 .....	22
3.4	本章小结 .....	23
第 4 章	汽柴油在炼厂生产阶段碳排放量化计算 .....	25
4.1	引言 .....	25
4.2	我国炼厂汽柴油生产现状 .....	25
4.2.1	炼厂生产装置构成 .....	25
4.2.2	汽柴油质量标准及生产情况 .....	25
4.3	炼厂生产阶段碳排放计算方法 .....	27
4.3.1	产品能耗计算 .....	28
4.3.2	炼厂碳排放因子计算 .....	32
4.4	典型炼厂汽柴油碳排放计算实例 .....	32
4.4.1	基础条件 .....	32
4.4.2	研究对象基本情况 .....	34
4.4.3	炼厂阶段碳排放计算结果 .....	36
4.5	本章小结 .....	40
第 5 章	汽柴油全生命周期碳排放计算实例 .....	41
5.1	引言 .....	41
5.2	WTT 阶段碳排放计算 .....	41
5.2.1	原油开采阶段 .....	41
5.2.2	原油运输阶段 .....	42
5.2.3	炼厂生产阶段 .....	43
5.2.4	成品油运输阶段 .....	44
5.2.5	WTT 阶段碳排放计算结果及相关说明 .....	44
5.3	TTW 阶段碳排放计算结果及相关说明 .....	48
5.4	WTW 阶段碳排放计算结果及相关说明 .....	48
5.4.1	WTW 阶段碳排放计算结果 .....	48
5.4.2	WTW 阶段结果分析 .....	50
5.5	本章小结 .....	53
第 6 章	结论与展望 .....	54

## 目 录

---

6.1 结论 .....	54
6.2 工作展望 .....	55
参 考 文 献 .....	56
致 谢 .....	59



## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

#### 1.1.1 研究背景

随着世界经济的快速发展，汽车行业及道路交通运输业快速发展，给人们的生活带来了极大的便利和改善。同时，也带来了潜在的环境问题。最新气候变化科学研究表明，大量使用化石燃料排放的 CO<sub>2</sub> 等温室气体导致全球气候系统变暖，已成为制约人类社会可持续发展的重大问题<sup>[1]</sup>。为控制气候变暖，CO<sub>2</sub> 减排刻不容缓。国际社会高度重视 CO<sub>2</sub> 减排工作，2015 年 12 月 12 日通过了全球气候变化的最新协议——《巴黎协议》，它将为 2020 年后全球应对气候变化行动作出安排，是一项有法律约束力的国际条约，是自 1992 年达成《联合国气候变化框架公约》、1997 年达成《京都议定书》以来，人类历史上应对气候变化的第三个里程碑式的国际法律文本，确立了一项综合性的全球应对气候变化的长期目标：控制全球温度升高不超过 2 °C，并力争实现温升不超过 1.5 °C 的目标。低碳经济已成为全球经济发展的共同趋势<sup>[2]</sup>。

我国作为经济发展最快的发展中国家，是世界能源消耗大国。据国际能源署（IEA）统计，2013 年我国能源消耗量约 195.32 亿吨，占世界能源消耗的 21%，是世界目前最大的能源消费国。与此同时，我国也成为目前世界最大碳排放国家。2013 年碳排放量已达 9023 Mt，占世界总排放量的 28%<sup>[3]</sup>。2013 年分地区世界能源消耗及碳排放情况如图 1.1、图 1.2 所示。

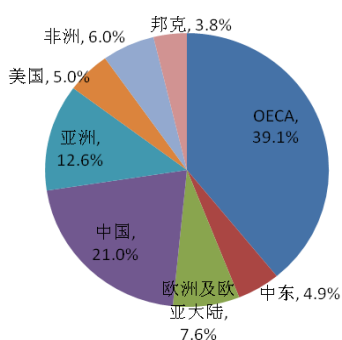


图 1.1 分地区世界能源消耗情况

Fig. 1.1 Regional shares of total final consumption

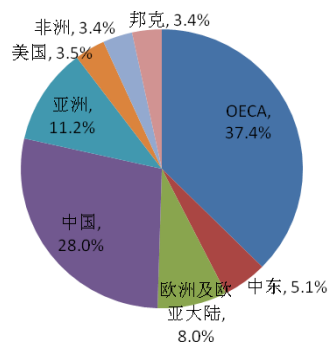


图 1.2 分地区世界能源燃烧碳排放情况

Fig. 1.2 Regional shares of CO<sub>2</sub> emissions from fuel consumption

为此,我国近年来采取各种措施进行碳减排,如制定减排目标,设定碳交易示范点,积极开发新能源、发展利用可再生能源等。“十二五”期间,我国清洁能源快速发展,水电、核电、风电、太阳能发电装机规模都有不同程度的发展,分别增长1.4倍、2.6倍、4倍和168倍,带动非化石能源消费比重提高了2.6个百分点<sup>[4]</sup>。未来,我国把生态文明建设作为“十三五”规划重要内容,并在巴黎大会提交的国家自主贡献文件中,提出将在2030年左右达到二氧化碳排放峰值,并力争争取早实现,2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%到65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右,森林蓄积量比2005年增加45亿立方米左右<sup>[2]</sup>。

为实现我国减排目标,各行各业都需作出努力。国际能源署(IEA)有关研究指出,全球交通领域的碳排放约占总体碳排放的23%,仅次于电力的46%,而道路交通排放又占运输总排放的73%<sup>[5]</sup>。近年来,随着汽车工业和交通运输业的发展,我国汽车保有量急速增长,从2005年到2014年,汽车保有量从3159万辆增加到14598万辆,年均增长率高达18%,且仍有巨大增长潜力。汽车保有量的快速增长,也促使汽柴油消费量急速增长。近十年来,汽油消费以年均18.45%的速度增长,消费量由2005年的4855万吨增加到2014年的10968万吨,其中用于机动车消费的汽油达85%以上<sup>[6]</sup>。柴油消费以年均8.3%的速度增长,消费量由2005年的10972万吨增加到2014年的17515万吨,其中用于交通运输业的柴油占50%以上。相关预测表明,未来我国汽柴油消费量还将持续增长<sup>[7]</sup>。这无疑对我国碳减排目标的实现产生不利的影响。

目前,无论是欧盟、美国还是日本,都通过立法来限制车辆碳排放。而汽车作为移动排放源,减排难。除了通过提高燃油经济性进行碳减排外,还可以通过提高油品质量,制定合理的油品质量标准来实现。一系列汽车技术和油品质量的研究表明,汽车制造商和炼油厂在燃油标准的作用下共同发展节能汽车技术很有必要。因此,欧美等发达国家也对炼油厂等大型排放源提出了减排要求。其中美国众议院在2009年通过了Waxman-Markey法案,该法案要求到2020年大型排放源(如电厂和炼油厂)的温室气体排放要比2005年减少17%,到2050年减少83%。更重要的是,法案还要求从2012年开始,炼油商要对其所生产的燃料燃烧产生的排放负责<sup>[8]</sup>。另一方面,欧洲等地区通过征收碳税和建立温室气体排放权交易平台来控制企业二氧化碳等温室气体的排放。

从国际形势看,汽车排放低碳化、炼油生产碳排放责任制已成为发展趋势。我国虽已制定相应的汽车碳排放法规,也设有探索碳排放交易试点,但较发达国家

家还有较大差距。展望未来，积极做好燃料碳排放量化工作是适应低碳发展的必然要求。

表 1.1 2005-2014 年中国汽车保有量及汽柴油消费量统计表

**Table 1.1 The statistics of car ownership and the consumption data of gasoline and diesel in China from 2005 to 2014**

年份	汽车保有量		汽油消费量		柴油消费量	
	总量 (万辆)	同比增长 (%)	总量 (万吨)	同比增长 (%)	总量 (万吨)	同比增长 (%)
2014	14598.11	15.22	10968	17.09	17515	2.12
2013	12670.14	15.89	9366	15.05	17151	1.09
2012	10933.09	16.85	8141	10.07	16966	8.51
2011	9356.32	19.92	7396	7.40	15635	6.84
2010	7801.83	24.22	6886	11.56	14634	6.38
2009	6280.61	23.16	6173	0.44	13757	1.66
2008	5099.61	17.01	6146	11.35	13533	8.29
2007	4358.36	17.88	5519	5.27	12497	5.59
2006	3697.35	17.02	5243	7.98	11835	7.87
2005	3159.66	17.30	4855	3.38	10972	10.89

数据来源：《中国统计年鉴》

### 1.1.2 研究意义

在碳排放环保法规日益严苛的形势下，低碳经济正成为一种必然的发展趋势和潮流。随着汽车保有量的增加，汽柴油消费不断增长，大量的汽柴油消耗排放较多的温室气体，造成巨大的碳减排压力。而汽车排放低碳化、炼油生产碳排放责任制的发展趋势以及碳税的征收、碳排放交易平台的不断完善对汽车燃料的碳排放提出量化要求。目前，我国仍是以石油生产车用汽柴油为主的国家，2012 年我国车用替代燃料使用量约为 1280 万吨左右，仅占全国汽油、柴油消费总量的 4.6%<sup>[9]</sup>。因此对以石油为原料的汽柴油产品进行碳排放量化计算很有必要。

作为石油产品，汽柴油在整个生产和使用过程中都会产生碳排放，因此研究包含炼厂生产和汽车使用阶段的从原油开采到燃油使用整个过程的碳排放具有重要意义：

(1) 通过计算汽柴油全生命周期的碳排放数据，可以整体反映汽柴油各生命周期阶段的碳排放情况，有利于抓大头略小头实施高效减排措施。同时，也为适应燃料低碳化发展，燃料碳标签及燃料碳税的产生和发展做准备工作；

(2) 可计算不同工艺流程工艺的炼厂碳排放量，比较不同工艺流程汽柴油碳排放情况，为炼厂选择合理高效的清洁生产技术支持提供碳排放支持；

(3) 计算不同品种牌号的汽柴油碳排放数据，可横向比较汽柴油碳排放情况，也可纵向比较同一种燃料不同质量的碳排放情况，为油品节能环保提供碳排放依据；也可以研究不同油品质量标准对汽柴油碳排放的影响，为燃油标准的制定提供碳排放依据。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 国外研究进展

近年来，国外对车用燃料碳排放研究十分重视，主要从两方面开展研究工作。一方面是对车用燃料从井口到车轮（WTW）的全生命周期碳排放进行评价研究，开发碳排放评价模型，多用来对比评价多种车用燃料的碳排放，美国在这方面的研究较成熟；另一方面是日本等国对燃料在炼厂生产和汽车使用阶段的碳排放进行量化计算，用于分析研究不同阶段汽柴油质量标准的变化对燃料在炼厂生产和汽车使用阶段碳排放产生的影响，特点是能够得出不同质量汽油在炼厂生产和汽车使用阶段产生的碳排放数据。

美国在车用燃料生命周期评价方面做了大量研究，并开发出多种生命周期评价的模型，建立了完善的基础数据库。早在1993年，美国加州大学加利福尼亚分校的Doelucchi利用自己开发的模型在全生命周期范围内对多种车用燃料碳排放进行分析比较，并得出相应结论<sup>[10]</sup>。在Doelucchi建立的模型影响下，美国阿冈国家实验室(Argonne National Laboratory)从1998年开始研究用于车用燃料生命周期能效和环境评价的模型，并成功开发GREET的模型，可评价多种车用燃料从井口到车轮（WTW）的温室气体排放和能效。此后，美国应用该模型对多种汽车替代燃料进行了大量的案例研究<sup>[11]</sup>。目前，GREET模型已在世界范围内的得到广泛应用。2009年，美国能源协会（API）研究并给出了石油天然气行业温室气体排放计算方法纲要，对石油和天然气产品各阶段碳排放计算给出具体计算方法，但需

要强大的数据支撑。2013年,美国斯坦福大学能源工程学院进行了石油产品全生命周期(LCA)温室气体排放研究,旨在建立一种通用的石油产品温室气体排放估算系统(OPGEE),目前还在进一步研究中<sup>[12]</sup>。

随着碳减排要求的提高,燃油质量标准日益严苛,使汽车生产部门和炼油厂在碳减排方面的成本越来越高。欧洲炼油行业研究协会(CONCAWE)联合欧洲汽车研发理事会(EUCAR)组成了欧盟联合研究中心(JRC),并发起了一系列燃料碳排放方面的项目研究。2000-2011年完成了从欧洲轿车替代能源的WTW评价项目,并对车用汽油中燃料乙醇含量对汽车油耗、排放等的影响进行研究,分析乙醇最大掺入量,为2020年替代能源的使用率目标的确定提供依据。2013年又对之前的WTW研究进行重新修整计算<sup>[13]</sup>。

车用燃料质量标准的日益严苛导致的汽车和炼厂碳减排成本的提高促使日本进行一系列汽柴油碳排放计算研究。2002年,日本石油能源协会(JPEC)对于车用燃料硫含量降低到10ppm时炼厂和汽车使用过程中汽柴油碳排放进行了相关研究,利用模型模拟炼厂生产过程,对汽柴油在炼厂生产阶段的碳排放进行较为准确的计算,并结合汽车使用阶段的碳排放计算,分析硫含量降低对汽柴油碳排放的影响,测算分析结果表明,炼厂碳排放将随硫含量的降低而升高,而总的碳排放则会由于汽车碳排放降低更多而减少。同时该研究还根据分析结果得出新汽柴油硫含量标准的合理实施时间<sup>[14]</sup>。

总体来说,国外车用燃料生命周期碳排放评价技术已相对成熟,且已开发出成熟的多种车用燃料间的WTW能效和碳排放评价软件。此外,汽车制造商和炼油厂在燃油标准的作用下共同探讨碳减排项目工作也取得成果。未来的发展趋势是建立更为专一、更为广泛使用的石油产品温室气体排放软件,重点研究炼厂生产和汽车使用阶段的车用燃料碳排放是汽车制造商和炼油厂共同发展低碳汽车技术的必然要求。

### 1.2.2 国内研究进展

与国外研究类似,我国在车用能源碳排放计算方面的研究多为多种车用能源对比分析研究。相比于国外,国内碳排放研究还不够完善,更多的是停留在借鉴国外研究的方法之上,特别是借鉴美国车用燃料WTW评价的GREET模型开展的研究工作很多。

对于车用能源基础计算数据研究方面,清华大学的欧训民等人对我国9种终端能源的全生命周期化石能耗及碳强度分析,涵盖原料制取、原料运输、燃料制取和燃料运输4个子阶段,并得出全生命周期一次化石能源消耗与碳强度计算结

果<sup>[15]</sup>。丁宁等人利用生命周期评价方法，研究我国化石能源从开采到加工的生命周期过程，建立的生命周期清单模型中给出了每种能源开采到加工的生命周期碳排放数据，揭示了我国能源生产的环境负荷，为工业系统分析和材料、产品的生命周期评价提供基础数据<sup>[16]</sup>。

在多种车用能源 WTW 碳排放评价分析研究方面，国内的研究大多是借用美国研发的 GREET 模型，比较系统的研究有：李宏刚等<sup>[17]</sup>对多种车用能源与车辆进行了从油井到车轮（WTW）评价研究。建立汽车和燃料的两个循环的研究范围，在定性分析、调研、咨询和模型模拟等工作的基础上，定量分析中国多种车用燃料的全生命周期能耗和排放效果。为我国未来车用能源发展提供了相应的技术参考。宋雯等<sup>[18]</sup>基于 WTW 燃料循环对我国煤基车用燃料的能量消耗和二氧化碳排放进行分析评价。胡志远<sup>[19]</sup>等对柴油及其替代燃料进行生命周期评价。建立了柴油、生物柴油、DME、F-T 柴油等柴油替代燃料的生命周期评价模型，并对他们进行了生命周期排放评价。在计算燃料生产过程的碳排放时，利用 EXCEL 分别编写汽油、柴油的生命周期排放计算模型，并利用相互引用和循环计算实现同一工作表内部和不同工作表间的迭代计算。黄志甲等<sup>[20]</sup>建立了汽车燃料的生命周期评价模型，提出了燃料上游阶段清单的计算逻辑，给出了模型的主要计算公式，并对氢燃料和汽油燃料进行生命周期碳排放比较。

在具体燃料生命周期各阶段碳排放分析研究方面，高有山等<sup>[21]</sup>对大型客车柴油燃料进行了 WTW 各生命周期阶段的能量消耗和温室气体排放定量分析。结果表明，车辆运行阶段占温室气体排放总量的 86.69%、原油开采阶段占温室气体排放总量的 1.92%、运输阶段占温室气体排放总量的 1.42%、炼油阶段占温室气体排放总量的 9.97%。由此可见，燃料使用阶段和炼油阶段的碳排放是燃料生命周期中碳排放的主要阶段。

总体来说，国内关于车用燃料 WTW 分析的研究也已相对较多，研究多侧重于多种车用替代燃料与传统汽柴油燃料之间的碳排放对比分析，已基本覆盖目前国内较为成熟的车用燃料技术。

### 1.2.3 综述小结

国内外基于车用燃料 WTW 碳排放分析工作已相对较多，多侧重于研究多种车用替代燃料与传统汽柴油在能耗、经济性和碳排放等方面的比较研究，多采用美国开发的 GREET 模型输入相关参数得到碳排放数据。对不同加工路线下的传统汽柴油碳排放计算没有细致深入的研究，特别是燃料在炼厂生产阶段的碳排放，

多采用能源利用效率及产品产率进行粗略的估值计算，无法反映不同炼厂加工流程对不同品种牌号车用燃料生产产生的碳排放的影响。

鉴于以石油为原料生产的汽柴油在相当长一段时间内仍在车用燃料中占主要地位，本文主要研究石油基汽柴油全生命周期碳排放计算。本文下述汽柴油若不做特别说明，均指以石油为原料生产的汽柴油。对于汽柴油在炼厂生产阶段的碳排放，不同的原油结构，不同的加工工艺流程都会对汽柴油碳排放核算产生影响，因此在车用燃料生命周期 **WTW** 研究的基础上，细化炼厂生产阶段汽柴油碳排放研究很有意义。

我国炼厂碳排放计算研究已相对成熟，但炼厂生产的产品碳排放计算还停留在用收率换算得到产品碳排放的基础上，所得产品碳排放数据笼统且无法反应油品品种、加工路线及不同质量油品生产产生的碳排放。因此，本文重点研究油品在炼厂生产阶段产生碳排放的计算方法。

### 1.3 研究内容、创新点、研究方法和技术路线

#### 1.3.1 研究内容

将生命周期理论与汽柴油产品碳排放计算相结合，核算汽柴油产品全生命周期的碳排放量。通过国内外关于碳排放计算方法的调研，了解汽柴油全生命周期范围及定义，通过学习国内外碳排放计算方法，结合汽柴油从生产到消费的全生命周期过程，建立汽柴油全生命周期碳排放计算方法和模型，测算不同品种牌号的汽柴油全生命周期的碳排放数据。一方面帮助炼油企业较为准确地估算汽柴油产品的碳排放量，为油品生产节能环保分析提供碳排放依据，为汽柴油产品碳标签的发展奠定基础。另一方面分析汽柴油各阶段碳排放情况，为制定各阶段碳减排策略提供数据支撑。主要研究内容包括以下几个方面：

（1）通过文献调研，了解汽柴油全生命周期的范围，建立汽柴油全生命周期碳排放的概念；

（2）参考现有的碳排放计算方法，结合汽柴油全生命周期各阶段碳排放特点，确定各阶段碳排放计算方法，并给出相关数据来源；

（3）分析炼厂产品加工过程和碳排放特点，重点探寻并确立汽柴油在炼厂生产阶段碳排放计算方法，选择典型炼厂，利用 **Aspen PIMS** 软件针对不同炼厂建立不同加工模型，通过流程优化测算分别得出各炼厂生产不同质量汽油和柴油的碳排放量；

(4) 针对炼厂生产实例，在炼厂阶段碳排放计算的基础上，结合之前建立的汽柴油各生命周期阶段的碳排放计算方法，测算由不同加工过程生产的不同质量汽柴油的全生命周期碳排放数据；

(5) 通过对整体的分析总结，得出本文的研究重点及结论，并提出下一步研究建议。

### 1.3.2 创新点

本文在全球变暖的背景下，立足低碳经济发展要求，将石油基汽柴油产品碳排放作为研究的核心内容，旨在构建联结炼油企业和汽车行业的汽柴油碳排放计算模型和方法。本文主要创新点如下：

(1) 基于生命周期理论，结合产品碳排放计算标准，确定汽柴油全生命周期五个阶段的碳排放计算方法和模型，并分析每一阶段的碳排放主要来源，主要应用排放因子法建立每一阶段碳排放计算模型。为油品节能环保提供依据，为应对油品碳排放标签的发展及碳税的征收奠定基础。

(2) 创新对汽柴油 WTT 阶段碳排放计算方法，即确定生产 1 吨油品的集合开采、运输与燃料生产阶段的碳排放计算方法，通过计算生产 1 吨油品的原油平均消耗量来确定 WTT 阶段原油开采和原油运输阶段的碳排放计算方法。

(3) 重点探寻汽柴油在炼厂生产阶段碳排放核算方法。确定汽柴油在炼厂生产阶段的能耗分配方法，通过 PIMS 软件建立炼厂模型，结合炼厂碳排放因子核算不同加工流程的炼厂生产不同品种牌号油品的碳排放数据，为炼厂选择低碳环保加工路线提供碳排放依据，也为炼厂进行产品结构调整同时考虑节能减排提供碳排放支持。

(4) 在汽车使用阶段，一方面研究不同牌号汽油和不同质量柴油在汽车使用阶段的碳排放情况，另一方面研究动力相当的汽油车和柴油车在此阶段产生的碳排放情况。



### 1.3.3 研究框架

在上述讨论的基础上，结合本文研究成果，得到本文的研究框架如图 1.3 所示。

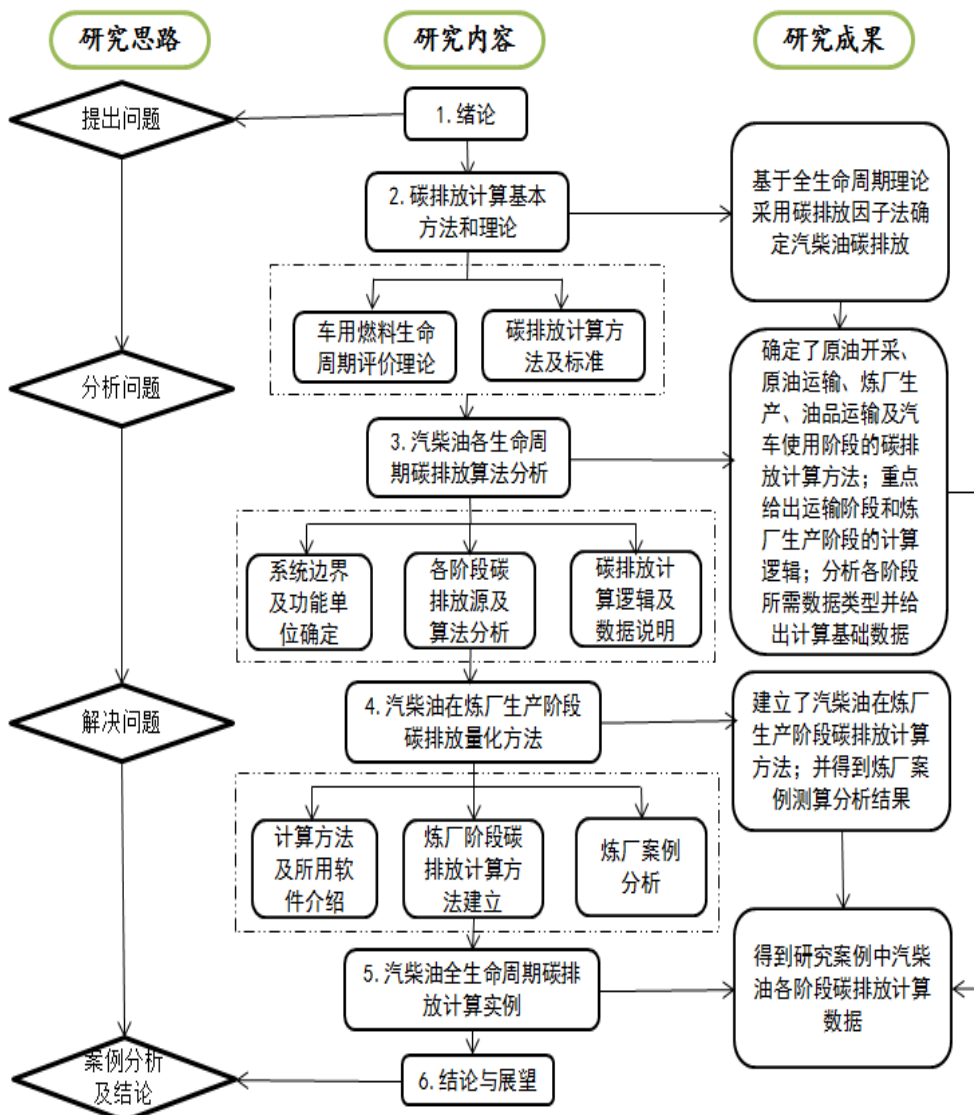


图 1.3 本文研究的技术路线

Fig. 1.3 Research framework of the thesis

## 第 2 章 碳排放计算基本方法和理论

### 2.1 车用燃料全生命周期评价理论

全生命周期评价（LCA）是评价一个产品系统从原料获取与初加工，到产品生产、营销、使用和维护，直至循环使用和最终废物处置的整个过程产生的环境影响的工具<sup>[22]</sup>。目前，它被广泛应用于评价产品、工艺过程和活动等产生的环境影响。

汽柴油作为能源产品，从原料开采、生产到使用的整个过程都会产生一定的能源消耗和碳排放，不同程度地影响环境。因此利用生命周期评价分析方法研究汽柴油从原油开采到汽车使用整个过程的碳排放很有必要。

随着能源问题和环境问题的日益凸显，车用燃料全生命周期评价已日渐发展成熟。目前应用最多的是美国提出的“从井口到车轮”（from well to wheels, WTW）分析，他们在这方面已做了 20 多年的研究，形成了 WTW 评价原理<sup>[20]</sup>。

WTW(Well-to-Well)评价方法主要用于分析燃料从原油开采、燃料生产再到车辆使用的不同阶段的能量消耗量和温室气体排放特点。WTW 主要包括两个阶段，即从井口到油箱的 WTT(Well-to-Tank)阶段和从油箱到车轮的 TTW(Tank-to-Wheel)阶段。WTT 阶段也称为车用燃料的上游阶段，即生产阶段，主要包括能源开采和运输、燃料生产和运输、分配、储存以及燃料加注过程；TTW 阶段也称为车用燃料的下游即使用阶段，主要进行汽车发动机的燃料消耗和温室气体排放情况分析研究<sup>[21]</sup>。

本文研究的汽柴油全生命周期范围碳排放是指从原油开采到车辆使用阶段的二氧化碳当量排放量。主要研究原油开采和运输阶段、炼厂生产和油品运输以及汽车使用阶段的碳排放量计算问题。

### 2.2 碳排放计算基本方法

#### 2.2.1 温室气体种类

根据《京都议定书》规定，目前温室气体限排的主要有以下六种：二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、甲烷（CH<sub>4</sub>）、氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）、全氟化碳（PFC）、氢氟碳化物（HFC）、和六氟化硫（SF<sub>6</sub>）。石油化工和炼油生产涉及的温室气体主要是 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 三种气体。因甲烷和氧化亚氮排放量仅占总排放量比例的 1%，主要来自燃料燃烧、泄露和逃逸，数据难以统计。根据 ISO14064-1 4.3.1

规定<sup>[23]</sup>，可对这两种气体免除量化。因此，石化工业生产温室气体排放种类主要考虑二氧化碳。

### 2.2.2 碳排放基本计算方法

随着碳排放量化研究的不断深入，对于不同研究对象也产生了多样的碳排放计算方法。目前，物料衡算法、实测法和排放因子法是碳排放计算方法中使用较为广泛的方法<sup>[24]</sup>。

#### (1) 物料衡算法

顾名思义，物料衡算法是采用物质能量守恒原理分析物料在使用过程中变化的一种定量分析方法。采用物料衡算法进行碳排放计算，即是采用整个过程中碳输入量等于产品碳含量与损失碳量之和的原理进行相应计算的<sup>[25]</sup>。具体计算公式表述如下：

$$\sum G_{投入} = \sum \text{产品碳含量} + \sum \text{损失碳量} \quad (2.1)$$

物料衡算法在计算过程中涵盖了工业排放源、工艺过程和物料能源消耗产生的碳排放。它是一种原理简单、适用性强的碳排放计算方法，不仅对整个生产过程的总碳排放量进行物料衡算适用，也对部分生产过程的碳排放进行物料衡算适用。目前很多碳排放方面的基础数据及碳排放源的碳排放估算数据的获取大多是采用物料衡算法来获得的。但是，物料衡算法对于原料较复杂、产品多样的炼厂生产的汽柴油产品的碳排放计算还是有困难的，且采用物料衡算法计算汽柴油碳排放时，无法具体反映汽柴油在各阶段生产过程中的碳排放情况。

#### (2) 实测法

实测法是采用监测及连续计量方法来得到碳排放数据的一种统计计算方法。通过监测计量排放气体的流速、流量和 CO<sub>2</sub> 浓度等数据，在环保部门鉴定认可的基础上，采用其监测测量数据进行碳排放总量计算。采用实测法计算碳排放的具体公式如下<sup>[24]</sup>：

$$G = k \times q \times c \quad (2.2)$$

式中，G 为 CO<sub>2</sub> 排放量；k 为 CO<sub>2</sub> 单位排放系数；q 为气体流量；c 为 CO<sub>2</sub> 浓度。

实测法通过对有代表性的样品进行实地监测得到一些基础数据，这样的方法得到的碳排放数据最为准确。但因具有代表性的样品不易确定且测试数据精度高，使得获取数据较困难同时成本较高，现无法得到广泛应用。因此，考虑到汽柴油全生命周期碳排放计算的复杂性及碳排放源的广泛性，实测法不适用于生产过程复杂的汽柴油产品碳排放的数据获取。

### (3) 排放因子法

排放因子法是一种计算单位产品生产所排放气体数量统计平均值的方法，是估算碳排放的一种方法。政府间气候变化专门委员会（IPCC）在《规定碳排放量计算方法时给出排放因子法估算办法》中指出：用活动数据乘以碳排放因子得到某核算对象的碳排放量估算值，同时给出排放因子法计算碳排放量的计算公式<sup>[25]</sup>：

$$G = AD \times EF \quad (2.3)$$

式中，AD 为某一碳排放源在过程中的消耗量（活动数据）；EF 为单位此排放源使用时排放的温室气体量（碳排放因子）。

排放因子法是比较方便的碳排放估算方法，本论文主要应用碳排放因子法对汽柴油各生产阶段碳排放量进行估算。其中，原油开采和运输阶段中各燃料消耗量（即活动数据）通过国家相关统计年鉴、文献调研或进行数据推算得到。各阶段相关碳排放因子通过文献调研及相关行业标准文件，部分因子的确定参考 IPCC 报告中给出的缺省值、国内外碳排放计算有关标准及方法中的数据。

## 2.3 国内外碳排放量化相关标准

为促进不同行业温室气体排放量化基本原则的一致、可信、可靠，近年来，国外诸多研究机构相继制定并发布了有关量化标准、规范或方法学。

### 2.3.1 国外碳排放量化相关标准

国际上，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）规定了三个层次的量化方法，旨在实现计算方法的尽量统一；世界资源研究所（WRI）联合各相关机构共同开发了一系列国际认同的温室气体核算及报告标准，在产品温室气体计算方面，成功完成《产品温室气体核算和报告标准体系》的编制工作，用于定量分析产品在整个生命周期的温室气体排放，并给出报告编写要求；国际化标准化组织（ISO）致力于温室气体减排管理的相关标准化工作，在产品碳排放评价方面，制定了 ISO 14067 产品碳足迹评价的国际标准<sup>[26]</sup>。英国和美国也在碳排放量化方面做出努力，并取得相应成果。2008 年 10 月，英国标准协会（BSI）颁布了《PAS 2050：商品和服务在生命周期内的 GHG 排放评价规范》标准，旨在为量化核查产品和服务碳足迹提供指导依据<sup>[27]</sup>；2004 年 2 月，美国石油协会（API）也出台了《石油工业温室气体排放方法学纲要》，首次为石油石化领域温室气体计算提供指导依据，并给出详细的碳排放计算方法<sup>[28]</sup>。

### 2.3.2 国内碳排放量化标准

跟随国际发展步伐，我国也积极开展碳排放量化标准研究工作。早在 2007 年，我国政府在“应对气候变化国家方案”中便提出要积极进行气候变化应对的建设性工作。近年来，中国标准化研究院、中国质量认证中心、发改委能源所等我国相关研究单位在国际标准 ISO14064-2006 的基础上，联合编制出我国碳排放量化相关的 GB/T 系列标准。此后，国内重点温室气体排放行业，如钢铁、水泥、石化等行业也陆续开展针对具体行业的温室气体量化方法标准的编制工作。其中，中国石化经济技术研究院在与相关机构合作的基础上，编制完成并颁布了“石油化工生产企业 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法”的行业标准<sup>[29]</sup>。

本论文在参考各标准的基础上，建立汽柴油各阶段碳排放计算方法，在炼厂碳排放计算时，主要参考石化行业碳排放计算的行业标准开展汽柴油产品在炼厂生产阶段的碳排放量化工作。

## 第3章 汽柴油各生命周期阶段碳排放算法分析

### 3.1 系统边界及功能单位的确定

#### 3.1.1 系统边界

本论文参考车用燃料生命周期理论，将汽柴油研究边界界定为从原油开采（Well）到炼厂生产再到汽车使用（Whell）的“油井”到“车轮”（WTW）整个生命周期的碳排放。主要包括原油开采、原油运输、炼厂生产、油品运输和汽车使用五个阶段，其中原油开采、原油运输、炼厂生产和油品运输为上游阶段（WTT阶段），汽车使用阶段为下游阶段（TTW阶段）。系统边界如图3.1。

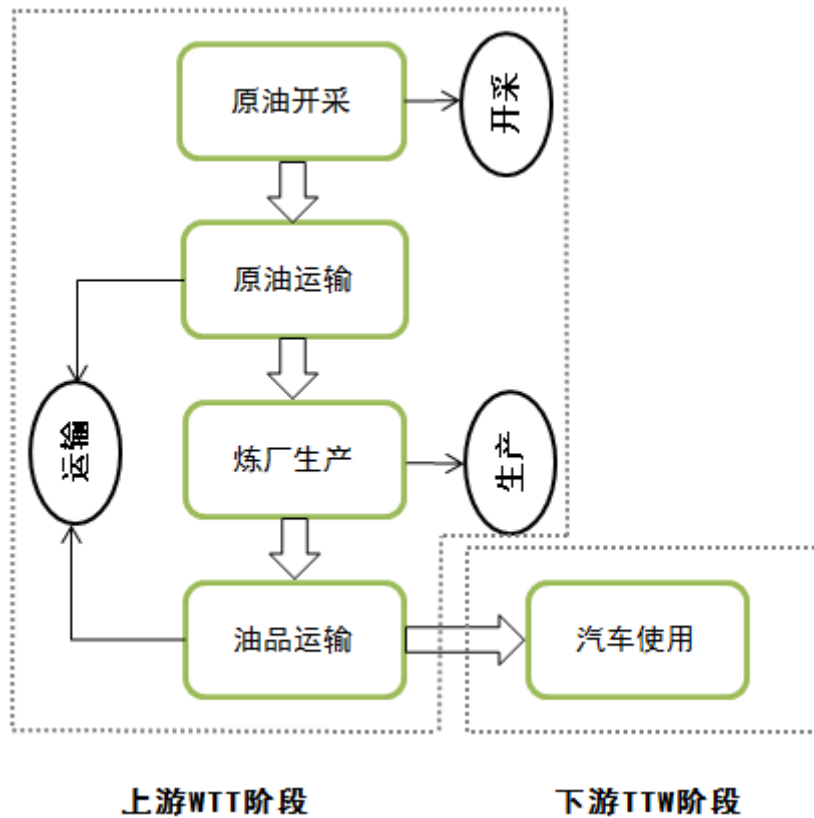


图 3.1 汽柴油生命周期计算边界

Fig. 3.1 The LCA calculation boundary of gasoline and diesel

### 3.1.2 功能单位的设定

本文将汽柴油产品功能单位分两阶段设定：在 WTT 阶段，功能单位统一设定为生产 1 t 油品所产生的碳排放量（ kg/t ）；在 TTW 阶段，功能单位设定为汽车行驶 1 km 燃料燃烧产生的碳排放量（ g/km ）。

两者之间通过汽车的燃油经济性数据建立联系。汽车行驶 1 km 的 WTW 碳排放量=汽车 1 km 燃料消耗量×（单位燃料燃烧的碳排放量+生产单位燃料所导致的碳排放量）

WTT 阶段和 TTW 阶段的单位不同，在计算得到 WTW 阶段碳排放时需将单位通过汽车燃油消耗量进行统一，统一后 WTW 阶段碳排放量的单位为 g/km。

## 3.2 汽柴油生命周期各阶段计算模型

### 3.2.1 前提条件

- （1）原油及成品油在生产及运输阶段的损失不考虑；
- （2）在原油开采和运输阶段：假设生产不同牌号汽油的单位原油开采和运输能耗相同，生产不同质量柴油的单位原油开采和运输能耗相同；
- （3）在炼厂生产阶段：假设生产过程中单装置产品产率及产品组成不变；采用实际研究年份的炼厂生产数据进行计算。

### 3.2.2 WTT 阶段碳排放计算模型

WTT 阶段包括原油开采、原油运输、炼厂生产及油品运输四个阶段，分别计算生产 1 t 油品每一阶段的碳排放量，加和得到 WTT 阶段生产 1 t 汽柴油所产生的碳排放。

$$G_{WTT} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \quad (3.1)$$

式中， $G_{WTT}$ ——生产 1 t 燃料 WTT 上游阶段碳排放量，kg/t；

$G_1$ ——原油开采阶段折算到油品碳排放量，kg；

$G_2$ ——原油运输阶段折算到油品碳排放量，kg；

$G_3$ ——炼厂生产阶段折算到油品碳排放量，kg；

$G_4$ ——油品运输阶段碳排放量，kg。

## 3.2.2.1 原油开采阶段

原油开采阶段主要包括油井勘探、原油开采、原油集输和处理、原油储运等工艺步骤。原油开采阶段碳排放主要来自于各类型工业锅炉和发动机所使用的燃料的燃烧以及电力等间接能源的使用所产生的碳排放<sup>[30]</sup>。

近年来，我国原油对外依存度不断增加，进口原油比例逐年升高。因此，在计算碳排放时也要考虑进口原油。原油开采阶段碳排放包括进口原油和国产原油开采两部分。通过国家统计局数据及文献调研数据，计算国内单位原油开采碳排放量，国外原油开采碳排放值参考美国能源协会（API）的计算值，结合进口原油所占比例，通过加权平均算出开采1 t原油的碳排放量。根据生产1 t燃料的原油消耗量计算汽柴油在开采阶段的碳排放量。具体计算公式如下：

$$G_1 = \alpha \times g_1 \quad (3.2)$$

$$g_1 = \beta \times g_{ei} + (1 - \beta) \times g_{ed} \quad (3.3)$$

式中， $G_1$ ——原油开采阶段折算到油品碳排放量，kg/t；

$\alpha$  ——生产1 t燃料的原油消耗量，t/t；

$g_1$  ——开采1 t原油的碳排放量，kg/t；

$\beta$  ——进口原油占比，%；

$g_{ei}$ 、 $g_{ed}$  ——分别为进口原油和国产原油单位开采碳排放，kg/t。

## 3.2.2.2 原油运输阶段

经过开采，原油需运输至各地炼油厂进行加工。运输阶段碳排放主要来源于交通运输工具消耗各类能源所产生的碳排放。

原油运输包括进口原油运输和国产原油运输两部分。进口原油主要通过海运及铁路运输，国产原油运输主要通过管道、铁路、水运及公路运输<sup>[30-31]</sup>。考虑到原油各种运输方式使用的燃料不同，在计算运输阶段碳排放时，需要运输方式及平均运距、各种运输方式的典型运输工具及其排放因子等数据。通过各类数据的收集，计算单位原油运输碳排放量，结合单位燃料原油需求量 $\alpha$ 计算生产1 t燃料在原油运输阶段的碳排放量。具体计算公式如下：

$$G_2 = \alpha \times g_2 \quad (3.4)$$

式中， $G_2$ ——原油运输阶段折算到油品碳排放量，kg/t；

$\alpha$  ——生产1 t燃料的原油消耗量，t/t。



根据原油运输方式占比，不同运输方式碳排放计算的平均运距及能源强度，结合不同运输方式的燃料类型及碳排放因子来计算原油运输单位碳排放量。计算公式如下：

$$g_2 = \sum D \times P \times (\sum (\gamma \times k)) \times \delta \quad (3.5)$$

- 式中， $g_2$ ——运输 1 t 原油的碳排放量，kg/t；  
 $D$ ——运输方式的平均运距，km；  
 $P$ ——运输方式的能源强度，MJ/(t·km)；  
 $\gamma$ ——各运输方式使用燃料比例，%；  
 $k$ ——各运输方式碳排放因子，g/MJ；  
 $\delta$ ——各运输方式占比，%。

### 3.2.2.3 炼厂生产阶段

燃料在炼厂生产阶段碳排放来源主要包括两大类，即直接排放和间接排放。直接排放主要包括燃烧排放、工艺排放以及逃逸排放，燃烧排放是炼厂生产过程中的化石燃料燃烧产生的排放，工艺排放是炼厂生产工艺过程中产生的碳排放，逃逸排放是各设备或装置在工作过程中未经加工而溢出的碳排放；间接排放主要包括外购电及蒸汽使用时所产生的碳排放。在炼厂生产过程中产生燃烧排放的设备一般包括蒸汽锅炉、热电锅炉、工艺炉以及火炬等；而 FCC 装置的催化剂烧焦、制氢装置的工艺排放以及其他装置催化剂再生等过程碳排放是工艺排放的主要来源<sup>[17,31]</sup>。

目前，我国有关炼厂碳排放计算的研究已经相对成熟，并且已颁布行业性计算标准——《石油化工生产企业 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法》<sup>[29]</sup>。鉴于此，对于汽柴油在炼厂生产阶段的碳排放计算，本文的计算思路是：按照《石油化工生产企业 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法》计算具体炼厂的碳排放量，换算得到消耗 1 kg 标准油当量能源产生的单位能源消耗碳排放量，即炼厂碳排放因子  $f_r$ ；然后计算出生产 1 t 油品所需的能源消耗量  $E_r$ ，便可得到炼厂生产 1 t 油品所产生的碳排放量。而如何确定单位油品生产的原油消耗量是本文要探讨的问题，所采用的具体计算方法及其在具体炼厂计算中的应用将在第 4 章列出。燃料生产阶段相关碳排放计算公式如下：

$$G_3 = E_r \times f_r \quad (3.6)$$

$$f_r = G_r / E \quad (3.7)$$

- 式中， $G_3$ ——炼厂生产阶段折算到油品碳排放量，kg；  
 $E_r$ ——生产 1 t 燃料的能源消耗量，kg 标油/t 燃料；

- $f_r$ ——炼厂碳排放因子, kg/kg;
- $G_r$ ——炼厂总碳排放量, kg;
- $E$ ——炼厂总能源消耗当量, kg。

### 3.2.2.4 成品油运输阶段

成品油运输阶段碳排放与原油运输阶段碳排放算法类似, 区别在于只需计算单位成品油运输碳排放量即可。计算逻辑与原油运输阶段类似, 计算公式也采用与原油运输类似的公式:

$$G_4 = \sum D \times P \times (\sum (\gamma \times k)) \times \delta \quad (3.8)$$

- 式中,  $G_4$ ——运输 1 t 成品油的碳排放量, kg/t;
- $D$ ——运输方式的平均运距, km;
- $P$ ——运输方式的能源强度, MJ/(t · km);
- $\gamma$  ——各运输方式使用燃料比例, %;
- $k$ ——各运输方式碳排放因子, g/MJ;
- $\delta$  ——各运输方式占比, %。

### 3.2.3 TTW 阶段碳排放计算模型

TTW 阶段即为汽车使用阶段, 该阶段碳排放来自汽车使用阶段汽柴油燃烧产生的碳排放。

汽车使用阶段的碳排放主要通过以下公式计算:

$$G_{TTW} = F \times Q \times f_u / 100 \quad (3.9)$$

- 式中,  $G_{TTW}$ ——汽车行驶 1 km 的 TTW 阶段碳排放量, g/km;
- $F$ ——汽车百公里油耗, L/100km;
- $Q$ ——油品热值, g/MJ;
- $f_u$ ——燃料碳排放因子, g/MJ。

### 3.2.4 全生命周期碳排放计算模型

WTT 阶段和 TTW 阶段通过汽车燃油消耗量相联系, 通过计算汽车行驶 1 km 的燃油消耗量反算出相应的 WTT 阶段的碳排放量, 加和得到 WTW 碳排放量。相关计算公式如下:

$$G_{WTW} = (F \times Q \times \rho \times G_{WTT}) / 100 + G_{TTW} \quad (3.10)$$

- 式中,  $G_{WTW}$ ——汽车行驶 1 km 的全生命周期燃料碳排放量, g/km;

$F$ ——汽车百公里油耗，L/100km；

$Q$ ——油品热值，MJ/L；

$\rho$  ——燃料密度，g/m<sup>3</sup>；

$G_{WTT}$ ——生产 1 t 燃料 WTT 上游阶段碳排放量，kg/t；

$G_{TTW}$ ——汽车行驶 1 km 的 TTW 阶段碳排放量，g/km。

### 3.3 WTW 计算方法分析

#### 3.3.1 WTT 阶段计算方法分析

##### 3.3.1.1 WTT 阶段计算逻辑

通过分析 WTT 阶段所包含的生命周期阶段可将 WTT 分为“开采”、“运输”和“生产”三个板块。各板块碳排放可通过上述相关计算模型来计算。其中运输阶段和生产阶段计算逻辑如图 3.2 和图 3.3 所示。

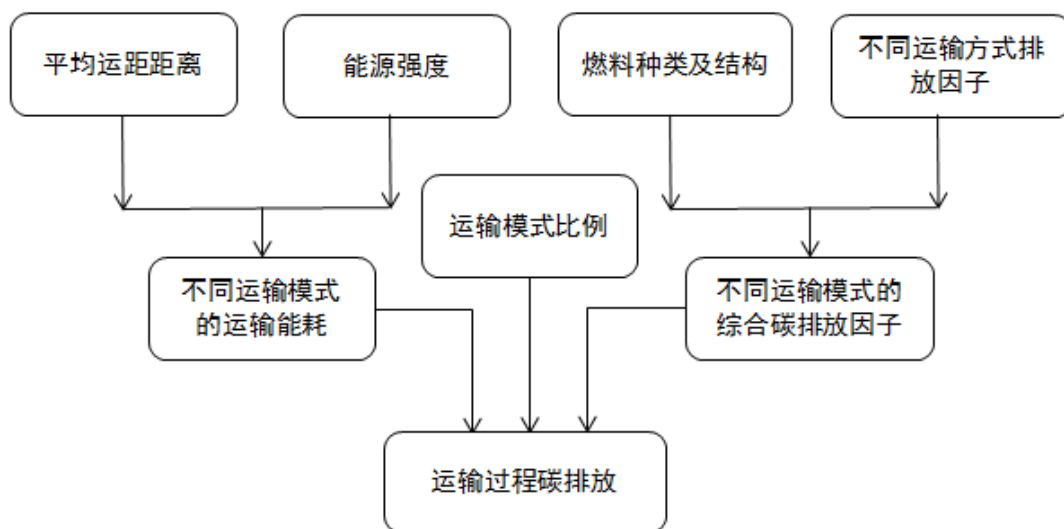


图 3.2 运输阶段计算逻辑

Fig. 3.2 The calculation logic of transport stage

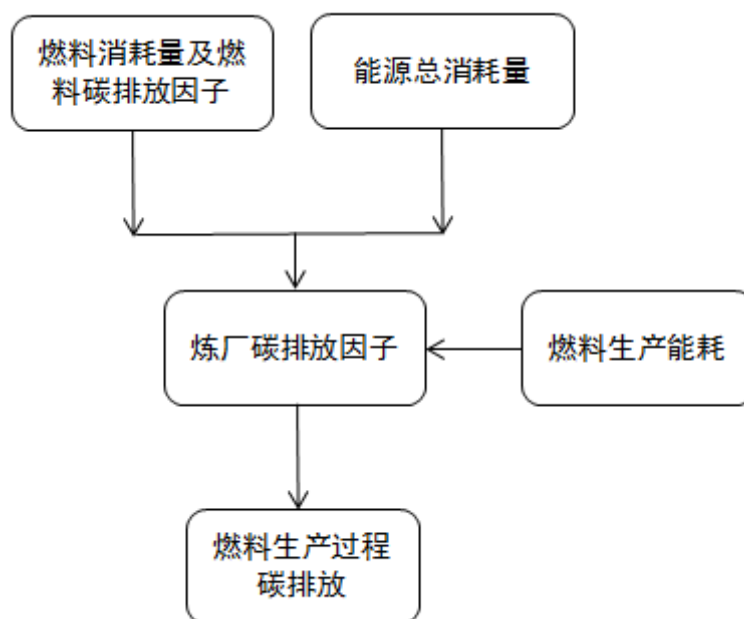


图 3.3 燃料生产阶段计算逻辑

Fig. 3.3 The calculation logic of fuel stage

### 3.3.1.2 WTT 阶段基本数据

由各板块计算逻辑可知，在 WTT 各阶段碳排放计算过程中所需的数据类型如表 3.1 所示。

表 3.1 WTT 各阶段所需数据类型

Table 3.1 The required data type of each WTT stage

所需数据	
原油开采	燃料消耗比例、各燃料燃烧技术及比例构成、各燃烧技术的排放因子
原油运输	运输模式种类、比例及平均运输距离、运输模式能源强度、各运输方式燃料构成及比例、各运输方式典型运输工具及排放因子
燃料运输	
燃料生产	炼厂加工原料量、产品质量产量数据、炼厂生产各装置能源消耗量数据及各能源的碳排放因子等数据

#### (1) 原油开采阶段基本数据

原油开采阶段碳排放需考虑进口原油开采和国产原油开采两部分。据国家统计局统计，2014 年我国原油加工总量为 5.198 亿吨，其中进口原油加工量为 3.08

亿吨，原油进口比例达 59.33%。汽油产量为 1.1 亿吨，生产 1 吨汽油平均消耗原油量为 4.71 t，柴油产量为 2.94 亿吨，较汽油产量多，生产 1 吨柴油平均消耗原油量为 2.95 t。

(2) 运输阶段基本数据

对于原油运输阶段碳排放计算，需考虑进口原油运输和国产原油运输碳排放两部分。清华大学中国车用能源研究中心通过大量调研得出我国石油和成品油的运输方式、平均运输距离及运输方式所占比例，其中石油运输的运输方式比例加和超过 100%，主要是考虑进口原油由国外运输至国内的情况。原油和成品油运输参数见表 3.2<sup>[15]</sup>。对于各运输方式的燃料种类及占比，各运输方式的运输能耗强度，欧训民等<sup>[32]</sup>进行了大量的研究，并整理得出能源强度及燃料结构如表 3.3 所示。对于不同运输方式的排放因子，高有山等人<sup>[30]</sup>通过碳平衡法计算出不同运输方式的排放因子，全面总结了现行多种运输方式的碳排放因子。不同运输方式的碳排放因子列于表 3.4。

表 3.2 原油和成品油运输参数

Table 3.2 The transport parameters of crude oil and oil products

运输模式	成品油运输		汽油、柴油、燃料油运输	
	比例 <sup>1)</sup> %	平均运距 km	比例%	平均运距 km
远洋	50.00%	11000	25.00%	7000
铁路	45.00%	950	50.00%	900
管道	80.00%	500	0.00%	160
水运	10.00%	250	15.00%	1200
短途公路	0.00%	0	10.00%	50

1) 成品油运输模式比例加和超过 100%是有考虑进口原油运输。

表 3.3 运输方式能源强度及燃料种类

Table 3.3 Transport energy intensity and fuel type

运输模式	能源强度	燃料种类及结构
	kJ/(t · km)	
远洋	23	燃料油 100%
铁路	240	柴油 55%，电力 45%
管道	300	燃料油 50%，电力 50%
水运	148	燃料油 100%
短途公路	1362	柴油 68%，汽油 32%

表 3.4 不同运输方式的碳排放因子 (g/MJ)

**Table 3.4 Carbon emission factors of different transport modes**

排放因子	内燃机车 (柴油)	游轮 (船用燃料)	货车 (柴油)	货车 (天然气)	货车 (汽油)	液体管道 (燃料油)
CH <sub>4</sub>	3.73	4.34	4.18	349.69	7.01	0.8
N <sub>2</sub> O	1.9	1.9	1.9	1.42	2.27	1.9
CO <sub>2</sub>	74100	79700	74000	56300	71700	78400
温室气体	74767	803801	74676	64083	72550	79005

### (3) 炼厂生产阶段基本数据

本文重点研究不同炼厂生产不同品种牌号油品的碳排放数据，在燃料生产阶段的计算需要炼油厂加工原料量、产品质量产量数据、各加工装置的能耗数据及不同能源的碳排放因子等数据。所需数据采用炼油企业 2014 年生产实际数据。

### 3.3.2 TTW 阶段计算方法分析

#### 3.3.2.1 TTW 阶段计算逻辑

本阶段为燃料使用阶段的碳排放计算，通过计算比较不同质量汽油和柴油在 TTW 阶段的碳排放量。依据车辆油耗和油品热值、密度等性质，结合汽柴油碳排放因子可计算得到车辆行驶阶段的碳排放量，单位为 g/km。

汽柴油作为汽车燃料分别用于汽油发动机和柴油发动机，因柴油发动机采用压燃方式运行，具有低转速、高马力、低油耗、运行成本低等优点。据有关调查研究数据显示，相同排量的柴油机比汽油机节油 30%~40%<sup>[33-34]</sup>。为了分析同一炼厂生产的汽油和柴油全生命周期碳排放，在研究中选择排量基本相同的汽油车和柴油车。油耗数据基本遵循上述规律。

在汽车使用过程中，汽油车油耗随汽油辛烷值的升高而降低，柴油车油耗随十六烷值适当升高也降低<sup>[35-36]</sup>。而汽车油耗与碳排放密切相关，因此，本阶段通过计算不同辛烷值汽油及不同十六烷值柴油汽车使用时的碳排放，研究同一炼厂生产的不同质量汽油和柴油在 TTW 阶段的碳排放量。

### 3.3.2.2 TTW 阶段基本数据

为了计算车辆在不同质量油品下的 TTW 阶段温室气体排放量，需要给出不同质量油品在同一车辆使用中的油耗数据及汽车排放因子数据。对于油耗数据，国内汽车行业关于汽油辛烷值与油耗、柴油十六烷值与油耗关系的测试数据较少。因此本文采用清华大学汽车安全与节能国家重点实验室研究结论<sup>[35-40]</sup>推算不同牌号汽油和不同质量柴油的油耗数据。对于碳排放因子，本文采用 IPCC 推荐的汽车使用过程中汽柴油燃料的碳排放因子数据。相关汽车油耗和油品性质数据列于表 3-5 和表 3-6。

汽油车车型为：GDI 型：直喷增压汽车（国 IV 排放），2.0L

表 3.5 汽油车油耗及油品性质数据

Table 3.5 Fuel consumption of gasoline car and property data of gasoline

汽油 RON	密度 g/cm <sup>3</sup>	低热值 MJ/L	汽车百公里油耗 L	汽车碳排放因子 g/MJ
92	0.747	32.1	8.14	70.8
95	0.753	32.2	7.97	70.8

数据来源：文献[35][36][41]

柴油车车型为：

DICI 型：涡轮增压汽车（国 IV 排放），2.0L

表 3.6 柴油车油耗及油品性质数据

Table 3.6 Fuel consumption of diesel car and property data of diesel

柴油 CTI	密度 g/cm <sup>3</sup>	低热值 MJ/L	汽车百公里油耗 L	汽车碳排放因子 g/MJ
45.5	0.847	36.6	6.4	74.1
51.5	0.835	36.8	5.7	74.1

数据来源：文献[35][36][41]

## 3.4 本章小结

本章对汽柴油全生命周期 WTW 碳排放分析的系统边界及功能单位进行设定，给出测算的假设条件。同时介绍了汽柴油生命周期各阶段产生碳排放的主要来源，并建立各阶段碳排放计算模型。将 WTT 阶段划分为“开采”、“运输”和“生产”

三个板块，给出每一板块计算的逻辑思路，并分析每一阶段计算所需数据，给出每一阶段计算的主要数据来源。同时也对 TTW 阶段的算法和数据来源作了简单介绍。为后续章节的计算提供依据。



## 第4章 汽柴油在炼厂生产阶段碳排放量化计算

### 4.1 引言

炼厂产品种类繁多,生产中能耗的合理分配是关系产品碳排放分配的重要环节。对于不同炼厂,加工原油种类不同,加工装置和流程不同,生产产品产生的碳排放量不同,炼厂碳排放因子有差异;对于同一炼厂,不同产品经过的加工装置存在差异,加工路线长短不同,所得产品的能耗量也不相同。如炼厂生产的汽油和柴油产品,汽油因调和组分较柴油多样,生产装置多,理论上其生产能耗应比加工过程较简单的柴油高,相应的碳排放量也较多;对于同一种产品,质量不同,调和组分分配不同,加工所需能耗不同,产生的碳排放也应不同。

因此,探寻炼厂生产阶段汽柴油产品能耗合理分配方法很有必要。

### 4.2 我国炼厂汽柴油生产现状

#### 4.2.1 炼厂生产装置构成

炼油厂一般由下列几类装置构成:

- (1) 常减压蒸馏装置:把原油按沸点不同分离为多种馏分油和残渣油;
- (2) 重油轻质化装置:将部分或全部重质馏分油和渣油转化为轻质油以提高轻质油收率的装置,一般包括催化裂化、加氢裂化、延迟焦化等加工装置;
- (3) 油品改质及精制装置:对油品进行改质或加氢精制以提高油品质量,符合油品质量指标要求。对汽油进行改质或精制的装置一般包括催化重整、加氢精制、S-ZORB 吸附脱硫等加工装置;对柴油进行精制的装置有柴油加氢等;
- (4) 气体加工装置:如气体分离、烷基化、C5/C6 异构化、MTBE 等;
- (5) 制氢装置;
- (6) 油品调合装置:对多种馏分油进行油品调合或加入各种可提高油品性能的添加剂,以得到满足产品质量要求的油品的装置;
- (7) 化工产品生产装置:如 C8 芳烃分离 (PX)、含 H<sub>2</sub>S 气体制硫磺等,某些化工装置的副产品如化工重芳烃是重要的汽油调合组分。

#### 4.2.2 汽柴油质量标准及生产情况

随着我国环保要求的不断提升,汽车尾气排放法规不断严苛,对车用汽柴油质量标准也不断提出更高的要求。

对于汽油质量标准，我国于 2013 年 12 月 18 日发布国五车用汽油标准，并从发布之日起实施，过渡期至 2017 年底，并于 2018 年 1 月 1 日起在全国范围内实施。与第四阶段车用汽油国家标准比较，国五车用汽油标准最主要变化可概括为“三减、二调、一增加”<sup>[42]</sup>。硫含量由 50 ppm 降为 10 ppm，锰含量由 8 mg/L 降为 2 mg/L，烯烃含量由 28% 降到 24%。由于降硫、降锰会引起辛烷值减少，加之我国汽油调和组分中高辛烷值组分较少，国五车用汽油标准将汽油牌号由国四标准的 90#、93#、97# 分别调整为 89#、92#、95#，并增加了 98# 车用汽油的指标要求。同时还调整汽油蒸气压值，增加了汽油密度指标的规定<sup>[42-44]</sup>。表 4.1 列出了车用汽油国 IV 和国 V 标准主要指标要求<sup>[45]</sup>。

表 4.1 国 IV、国 V 汽油标准主要指标

Table 4.1 The main indicators of the fourth and fifth phase gasoline standards

	国 IV	国 V
硫含量, ppm	≧50	≧10
苯含量, %	≧1	≧1
烯烃含量, %	≧28	≧24
汽油牌号	90/93/97	89/92/95/98

与车用汽油质量标准相比，我国的柴油质量标准相对比较落后。2009 年才针对专门用于汽车使用的车用柴油制定强制性的标准，开始分用途强制执行不同标准，2011 年将轻柴油标准更换为普通柴油标准。对于车用柴油，2013 年发布并实施国 IV 车用柴油标准，并规定 2015 年在全国供应硫含量为 50 ppm 的车用柴油。而在同年 6 月底，第五阶段车用柴油质量标准也开始实施，要求车用硫含量降到 10 ppm，并于 2018 年在全国范围内实施。对于普通柴油，目前实施在 2015 年 5 月 8 日发布并实施第五阶段《普通柴油》质量标准，硫含量要求降为 350 ppm<sup>[44,46]</sup>。表 4.2 给出了车用柴油及普通柴油的主要指标要求<sup>[47-48]</sup>。

我国汽油调和组分中催化汽油比例大，低烯烃、低芳烃及高辛烷值组分较少，对车用汽油的生产影响较大。目前国内炼厂已基本完成国 V 质量升级改造，炼厂所产车用汽油基本为 92# 和 95# 满足 V 质量标准的汽油产品。对于柴油生产，主要生产普通柴油和车用柴油。因此，本文主要选择与实际生产相符的 92#、95# 汽油以及普通柴油、车用柴油为研究对象测算其生命周期碳排放。

表 4.2 国IV、国V柴油标准主要指标

Table 4.2 The main indicators of the fourth and fifth phase diesel standards

	国IV车用柴油	国V车用柴油	国V普通柴油
硫含量, ppm	≧50	≧10	≧350/50/10
十六烷值	≧51	≧51	≧45
多环芳烃, wt%	≧11	≧11	-
密度, kg/m <sup>3</sup>	810-850	810-850	-

### 4.3 炼厂生产阶段碳排放计算方法

本节主要介绍汽柴油在炼厂生产阶段的碳排放计算方法。按照第 3 章炼厂生产阶段碳排放计算思路，通过对能耗分配方法、PIMS 炼厂建模软件的介绍，详细给出炼厂产品单位生产能耗的计算方法，然后结合炼厂碳排放因子，得到产品在炼厂生产阶段的碳排放数据。本节内容框架如图 4.1 所示。

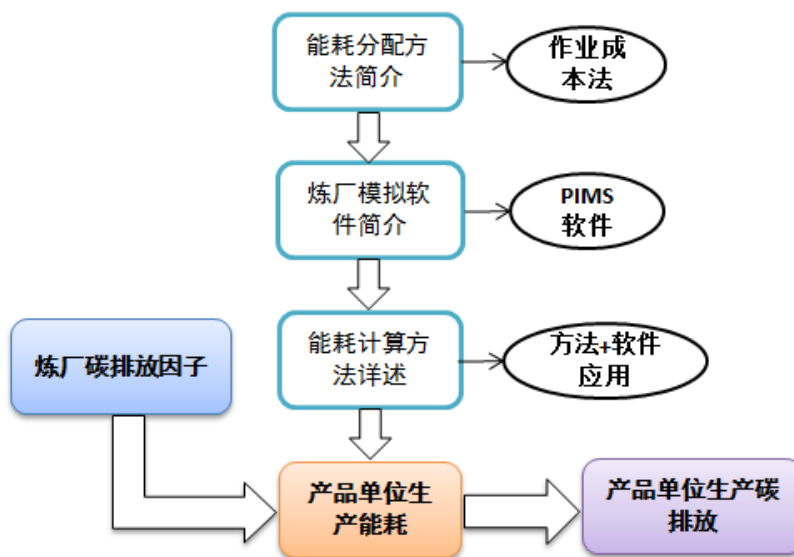


图 4.1 炼厂生产阶段碳排放计算思路图

Fig. 4.1 The LCA calculation boundary of gasoline and diesel

### 4.3.1 产品能耗计算

#### 4.3.1.1 计算方法

目前对于车用燃料在生产阶段的能耗计算，大多是应用简单的能源消耗量与产品产率来计算，忽略了炼厂加工流程对产品能耗的影响，不利于炼厂进行合理的产品能耗分配。为更合理分配炼厂能源消耗量，反映不同品种牌号汽柴油生产所需能耗，进而确定生产不同品种牌号汽柴油的碳排放量，本文将引用目前成本计算方法较为流行的作业成本法的思路进行能耗量分配。

##### (1) 作业成本法概述

作业成本法（Activity-based costing）是通过作业把间接成本分配到成本对象的一种成本核算方法，是目前最准确核算成本的方法之一<sup>[49]</sup>。其中，作业（Activity）是指需要进行操作并因此消耗资源的流程或程序。与传统成本计算方法不同，作业成本法是将“作业”作为核算对象，而不再直接把“产品”作为核算对象，遵循“产品消耗作业，作业消耗资源”的指导思想，以作业为中介将资源消耗更好地分配到产品中。即将制造企业的产品细分到作业，核算每一种产品的作业消耗和每一项作业的资源消耗，从而得到更加全面的成本分析信息，将更加详细准确的成本信息提供给制造企业管理者<sup>[50]</sup>。

利用作业成本法的核算主要是分两步进行，在确定作业的基础上，一是通过资源分配动因将资源分配到作业；二是通过作业分配动因将作业消耗分配给产品，最终将资源消耗通过作业分配到具体产品。具体原理和使用步骤如图4.2和4.3。

目前越来越多的企业开始采用作业成本法。虽然作业成本法使用的初衷是进行产品的成本核算，但作业成本法的思路也可以被引用到其他领域<sup>[51]</sup>。本文应用作业成本法的核算原理和核心思想，将“产品成本”转化为“油品能耗”，采用作业成本法计算汽柴油产品在炼厂生产阶段的能耗量，进而通过炼厂碳排放因子的计算确定产品碳排放量。

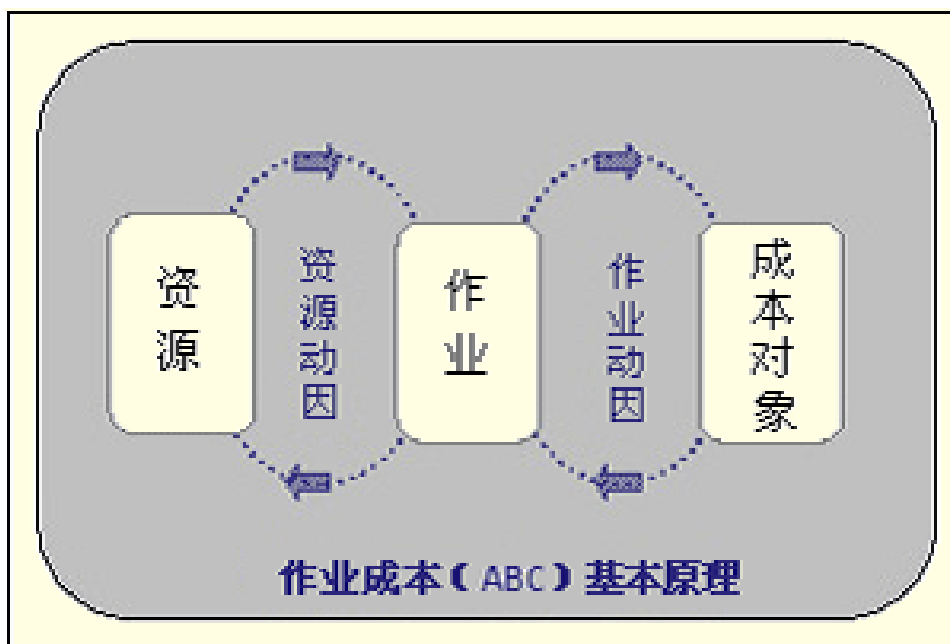


图 4.2 作业成本法原理图

Fig. 4.2 The diagram of Activity-based costing theory

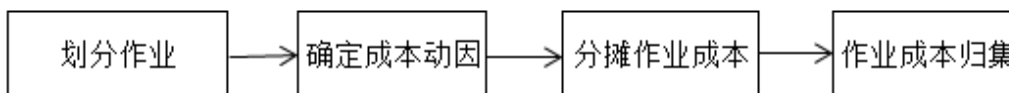


图 4.3 作业成本法应用步骤

Fig. 4.3 Using steps of Activity-based costing

## (2) 应用作业成本法进行产品能耗分配的适用性分析

炼油厂自身特点有利于作业成本法的应用。一是油品生产加工流程清晰明确，每一生产装置都可以作为一个作业来进行核算；二是资源分配动因明确，每一个装置的能源消耗均可以以装置为单位进行统计分配；三是作业分配动因明确，每套装置都可通过产品收率将装置能耗分配到产品。这些都体现了作业成本法在炼厂产品能耗分配过程中应用的可行性和适用性。

炼厂产品碳排放分析需要采用作业成本法进行能耗核算。一是炼厂产品结构复杂多样，需要将能耗合理分配到每一种产品；二是汽柴油调和组分多样，需要通过调和组分的能耗分析得到不同品种牌号汽柴油产品能耗数据。

综上所述，应用作业成本法计算汽柴油在炼厂生产阶段能耗量符合炼厂生产特点和本文核算需求，同时也是计算汽柴油在炼厂生产阶段碳排放的必要基础。

(3) 作业成本法在产品能耗计算中的应用

作业划分：将炼油厂各生产过程和相应的装置划分为作业，将生产某一产品的连续作业作为同质作业。如可将电脱盐、常压蒸馏、减压蒸馏等作为常减压蒸馏作业链<sup>[52]</sup>。具体作业划分如表 4.3 所示。

表 4.3 炼厂阶段作业划分

Table 4.3 The divisions of activities in fuel stage

产品能耗消耗作业		
常减压蒸馏	延迟焦化	蜡油加氢精制
催化裂化	丙烷脱沥青	渣油加氢精制
重油催化	气体分馏	汽油加氢精制
加氢裂化	制氢	柴油加氢精制
催化重整	糠醛精制	酮苯脱蜡

能耗数据：炼厂在生产过程中消耗的燃料油、燃料气、水、电、催化烧焦等能源消耗量数据。

能耗分配动因：以划分为作业的炼厂生产装置为分配单位，将能耗数据分配到各加工装置。本文采用中石化炼厂提供的各生产装置各类能耗数据，通过等值系数将各能源消耗量统一换算为 kg 标油。

作业分配动因：对于每一作业，即相应生产装置，以各装置产品收率为分配动因将装置能耗分配给产品。

4.3.1.2 炼厂模型建立

炼厂建模中使用 Aspen PIMS 软件。

(1) PIMS 软件介绍

石油化工领域的生产经营优化软件，以线性规划的数学基础为核心<sup>[53]</sup>，结合先进的计算机技术，为原油选购、流程安排、产品结构优化、经营效益测算等生产经营过程提供决策依据，提升企业管理水平<sup>[54]</sup>。

(2) PIMS 软件介绍的工作流程及模型结构

PIMS 工作流程<sup>[55-58]</sup>：首先，建模人员利用微软公司的 Excel 软件完成建模过程，并通过 PIMS 软件将 Excel 表按一定规则挂到 PIMS 模型树上，并数据管理器

进行数据识别；模型初步构建完成后，通过 PIMS 自带的资料核查功能，进行矩阵生成，如果建模无误，则进行的最优化求解过程，如果资料核查过程中出现问题，根据 PIMS 的建模规则及警告提示进行查误工作；资料核查无误后，PIMS 调用求解器进行线性问题求解，求解中利用分布递归技术，求解过程完成后，按照用户选定的格式，生成不同类型的报表以供查询<sup>[59]</sup>。

单厂 PIMS 模型由工艺装置模块、调和模块、经营模块和数学递归模块等组成<sup>[60]</sup>，包括了炼厂的生产加工过程和营运管理过程。单厂 PIMS 模型构造见图 4.4。

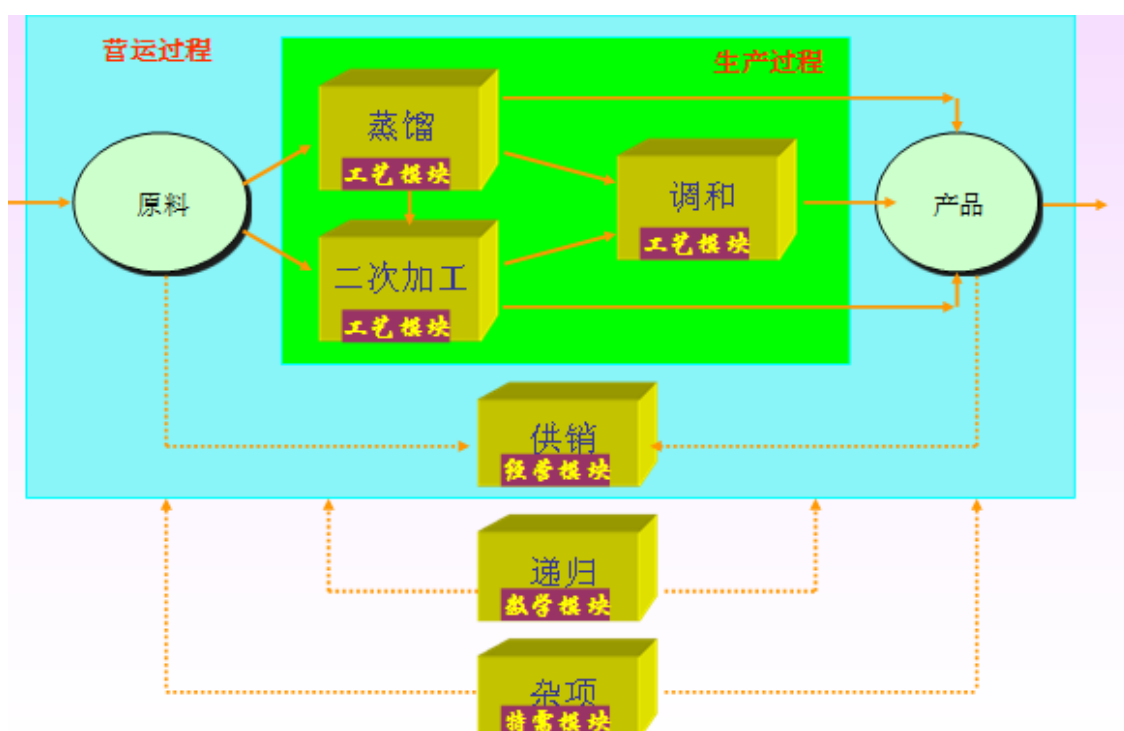


图 4.4 单厂 PIMS 模型结构

Fig. 4.4 PIMS model structure of single plant

### (3) PIMS 主要表格介绍

PIMS 建模方式以 Excel 为主，输入格式是电子表格及资料库，输出格式是文本格式、电子表格、图表格格式、流程图等多种形式。PIMS 模型就是一系列的电子表格，按照功能可以大致分为供需表、蒸馏表、二次加工装置表、产品调和表、递归表、杂项表和周期表等<sup>[51]</sup>。

### (4) Aspen PIMS 在本文中的应用

本文通过 Aspen PIMS 软件对炼厂实际生产运营情况进行模拟测算，导出生产流程图和产品调和组分表。在流程图基础上进行能耗分配计算。

### 4.3.1.3 能耗具体计算方法

(1) 模型建立及结果输出：利用 Excel 表格针对具体炼厂进行模型构建，通过运行 Aspen PIMS 软件进行测算，分析测算结果并导出炼厂加工流程图及产品调和组分性质表。

(2) 能耗分配计算方法：作业成本法。以加工装置为作业计算每一装置的能耗量，并以相应装置产品收率将装置能耗分配给产品。

(3) 能耗单位基准：将装置所消耗的水、电、蒸汽、燃料油、燃料气及催化烧焦等能源通过等量系数均折算为千克标油，在炼厂能耗计算中均以千克标油为基准单位。

(4) 数据来源：炼厂能耗数据以 2014 年炼厂各装置实际能源消耗数据为准。

(5) 具体能耗计算方法简述：1.基于汽油/柴油调和组分性质表，找出与汽油/柴油各调和组分生产相关装置，计算每一调和组分单位生产能耗；2.假设原油进炼厂前的能源消耗量为 0，每一装置的总能耗是该装置原料带入能量和该装置本身消耗能量之和，经过该加工装置的中间产品的单位生产能耗则为这一能耗之和除以装置加工能耗。3.通过能耗计算得到汽柴油各调和组分的单位生产能耗，结合油品质量调和表中各调和组分调和量，加权平均得到汽油或柴油单位生产能耗。

### 4.3.2 炼厂碳排放因子计算

本文所指的炼厂碳排放因子是在炼厂能源消耗通过等量系数换算为 kg 标油的基础上，消耗 1 kg 标油能源产生的碳排放量。

炼厂碳排放因子计算方法：1.结合炼厂生产燃料消耗量数据及各燃料消耗碳排放因子计算炼厂总碳排放量；2.通过等量系数将炼厂消耗的不同能源换算为 kg 标油；3.总碳排放量与总能耗量相除得到炼厂碳排放因子。

## 4.4 典型炼厂汽柴油碳排放计算实例

为了确定不同品种牌号汽柴油在不同炼厂加工过程中的碳排放情况，以便验证炼厂计算方法的可行性。本文选用三个典型炼厂进行油品碳排放测算。

### 4.4.1 基础条件

(1) 炼油厂基本情况：

A 炼油厂：500 万吨，较小的炼油企业，无蜡渣油加氢预处理

B 炼油厂：1000 万吨，炼油+乙烯型，有渣油加氢，有焦化，无蜡油预处理



C 炼油厂：1250 万吨，炼油型炼厂，有蜡油加氢、焦化，无渣油加氢预处理

(2) 前提条件：利用 Aspen PIMS 线性优化软件针对不同炼厂建立模型，尽量模拟与实际生产情况类似的效益最大化生产情况。

(3) 案例设置：针对不同炼厂建立与实际生产相符的生产方案，主要生产 92# 国 V 汽油和 95# 国 V 汽油、普通柴油和国 V 柴油。其中汽油和柴油质量标准设置如表 4.4 和表 4.5 所示。

表 4.4 汽油控制指标

Table 4.4 Control Index of gasoline

	92#车用	95#车用
硫含量, wt%	0.0010	0.0010
研究法辛烷值	92.2	95.2
烯烃含量, wt%	24	24
苯含量, wt%	0.95	0.95
芳烃含量, wt%	39	39
最大 MTBE 含量, wt%	13	13

表 4.5 柴油控制指标

Table 4.5 Control Index of diesel

	普柴	国 V
硫含量, wt%	0.0010	0.0010
十六烷值	45.5	51.5
密度, wt%		≥0.845

(4) 汽柴油产率数据：通过运行 Asepen PIMS 模型，分别得到不同炼厂加工装置的油品产率及生产相关装置等。

(5) 汽柴油生产单位能耗计算：按照作业成本法，计算生产 1 吨汽油/柴油的能源消耗量，单位为 kg 标油。

(6) 对各案例运算结果进行分析：比较不同牌号汽油和不同质量柴油产品的能耗。

(7) 结合各炼厂碳排放因子计算，对炼厂生产不同品种牌号产品的碳排放量进行计算、分析。

#### 4.4.2 研究对象基本情况

##### 4.4.2.1 汽柴油生产相关装置

表 4.6 汽油生产相关装置

Table 4.6 Gasoline production-related equipment

A 炼油厂	B 炼油厂	C 炼油厂
常减压装置	常减压装置	常减压装置
重整装置	重整装置	重整装置
重油催化装置	芳烃抽提	重油催化装置
蜡油催化装置	重油催化装置	蜡油催化装置
柴油加氢	蜡油催化装置	加氢裂化装置
汽油改质装置	加氢裂化装置	延迟焦化装置
催化汽油加氢	延迟焦化装置	丙烷脱沥青装置
气体分馏	丙烷脱沥青装置	糠醛精制
MTBE	糠醛精制	酮苯脱蜡
	酮苯脱蜡	渣油加氢装置
	渣油加氢装置	催化汽油加氢
	柴油加氢	气体分馏
	催化汽油加氢	MTBE
	气体分馏	烷基化装置
	烷基化装置	

表 4.7 柴油生产相关装置

Table 4.7 Diesel production-related equipment

A 炼油厂	B 炼油厂	C 炼油厂
常减压装置	常减压装置	常减压装置
重整装置	重整装置	重整装置
重油催化装置	重油催化装置	重油催化装置
蜡油催化装置	蜡油催化装置	蜡油催化装置
柴油加氢	加氢裂化装置	加氢裂化装置
	延迟焦化装置	延迟焦化装置
	丙烷脱沥青装置	丙烷脱沥青装置
	糠醛精制	糠醛精制
	酮苯脱蜡	酮苯脱蜡
	渣油加氢装置	渣油加氢装置
	柴油加氢装置	柴油加氢装置

4.4.2.2 炼厂汽柴油调和组分

表 4.8 汽油调和组分表

Table 4.8 Blending component table of gasoline

A 炼油厂	B 炼油厂	C 炼油厂
加氢吸附脱硫催汽	加氢吸附脱硫催汽	加氢吸附脱硫催汽
抽提汽油	重整汽油	重整汽油
重整抽余油	重整抽余油	重整抽余油
拔头油	重芳烃	加氢裂化轻石脑油
改质汽油	戊烷	烷基化油
MTBE	加氢裂化轻石脑油	MTBE
	加氢石脑油	
	拔头油	
	外购碳七碳八	
	烷基化油	
	MTBE	

表 4.9 柴油调和组分表

Table 4.9 Blending component table of diesel

A 炼油厂	B 炼油厂	C 炼油厂
加氢直馏柴油	加氢直馏柴油	加氢直馏柴油
加氢催化柴油	加氢催化柴油	加氢催化柴油
	加氢裂化柴油	加氢裂化柴油
	加氢焦化柴油	加氢焦化柴油
	加氢蜡渣柴油	加氢蜡渣柴油

#### 4.4.3 炼厂阶段碳排放计算结果

按照本章 4.3 节建立的炼厂阶段碳排放计算方法和模型, 首先基于作业成本法对不同炼厂生产汽柴油的能耗进行分配计算, 然后通过计算炼厂碳排放确定炼厂碳排放因子, 最后根据计算公式得到本文所研究炼厂的相关计算数据。

##### 4.4.3.1 计算结果

基于炼厂生产阶段汽柴油能耗和碳排放计算方法得到 A、B、C 各炼厂生产汽柴油单位能耗和碳排放数据, 计算结果分别列于表 4.10 和表 4.11。

表 4.10 各炼厂生产汽柴油单位能耗(kg/t)

Table 4.10 Unit energy consumption of gasoline and diesel from different refineries

	A 炼厂	B 炼厂	C 炼厂
92#	78.70	97.50	93.48
95#	88.27	108.56	116.13
普柴	25.68	62.69	47.38
车柴	24.40	50.44	42.34

表 4.11 各炼厂生产汽柴油单位碳排放(kg/t)

Table 4.11 Unit carbon emissions of gasoline and diesel from different refineries

	A 炼厂	B 炼厂	C 炼厂
92#	391.15	453.67	473.22
95#	438.69	505.11	587.86
普柴	127.65	291.71	239.82
车柴	121.24	234.71	214.34

#### 4.4.3.2 计算结果分析

##### (1) 能耗计算结果分析

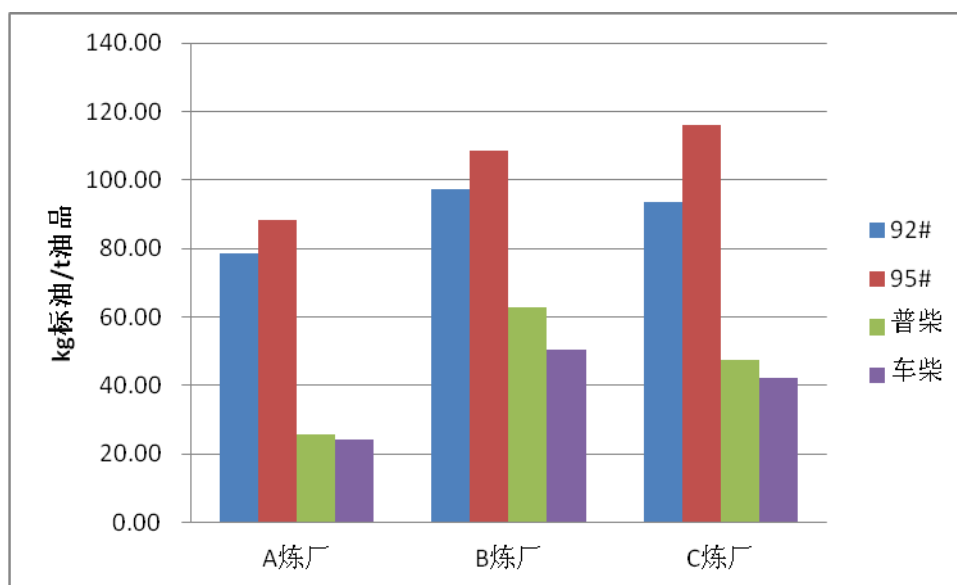


图 4.5 各炼厂生产汽柴油单位能耗数据图

Fig. 4.5 Unit energy consumption of gasoline and diesel from different refineries

由图 4.5 可以看出,对于同一炼厂,生产汽油单位能耗远远高于柴油单位能耗。不同炼厂之间,加工流程简单的 A 炼厂生产汽柴油单位能耗比 B、C 炼厂的一半还低,而 B、C 炼厂之间生产汽柴油单位能耗则与调和组分及装置能耗有关。

对于汽油,高标号的 95#汽油单位生产能耗比低标号的 92#汽油高,大概高出 10 个单位左右,主要原因是高标号汽油需要更多的高辛烷值组分进行调和,而高辛烷值组分如重整汽油、烷基化油等,其生产能耗高或所经历的加工流程长,从而使得高标号汽油生产能耗较高。

相反,对于柴油来说,十六烷值低的普柴的单位生产能耗反而比十六烷值高的车柴高,主要是因为我国车柴调和组分主要是加氢直馏柴油,普柴调和组分主要是加氢催化柴油,而加氢直馏柴油因所经历的加工流程短而生产能耗较低,同时直馏柴油加氢装置能耗一般比催化柴油加氢装置低造成的。

## (2) 碳排放计算结果分析

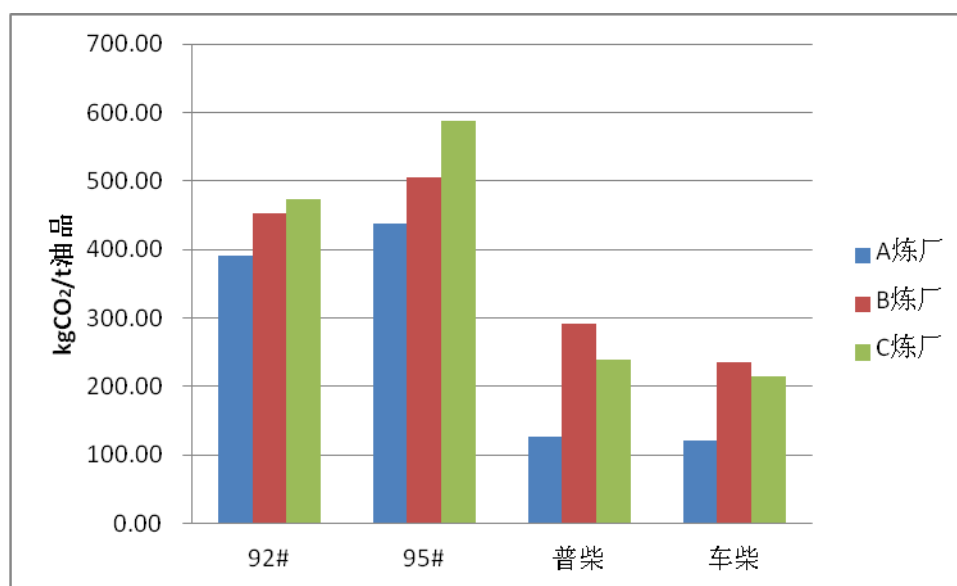


图 4.6 不同炼厂同种油品碳排放对比图

Fig. 4.6 Comparison chart of carbon emissions from gasoline or diesel produced by different refineries

由图 4.6 可以看出，不同炼厂生产汽柴油单位碳排放不同，且生产汽油单位碳排放比柴油高。

对于 92#汽油生产，加工流程复杂的 B、C 炼厂生产 1 吨 92#汽油比加工流程较简单的 A 炼厂碳排放量平均多出 18%，而加工量相当的 B、C 炼厂生产 1 吨 92#汽油的碳排放量相差不大；对于 95#汽油生产，C 炼厂生产 1 吨 95#汽油比 A 炼厂碳排放多 34%，比 B 炼厂也高出 16%，主要原因是 C 炼厂 95#汽油同时调入高辛烷值高能耗的 MTBE 和烷基化油组分。

对于普柴生产，生产 1 吨普柴 B 炼厂排放 291.7kg CO<sub>2</sub>，A 炼厂仅排放 127.65 kg CO<sub>2</sub>，B 炼厂普柴单位生产碳排放比 A 炼厂多 130%，C 炼厂普柴单位生产碳排放也要比 A 炼厂的多 88%；对于车柴生产，B、C 炼厂生产 1 吨车柴排放的碳排放量平均是 A 炼厂的 1.85 倍，B 炼厂也比 C 炼厂的稍高。B 炼厂柴油单位生产碳排放较 C 炼厂稍高的原因是炼厂装置能耗存在略微差异。

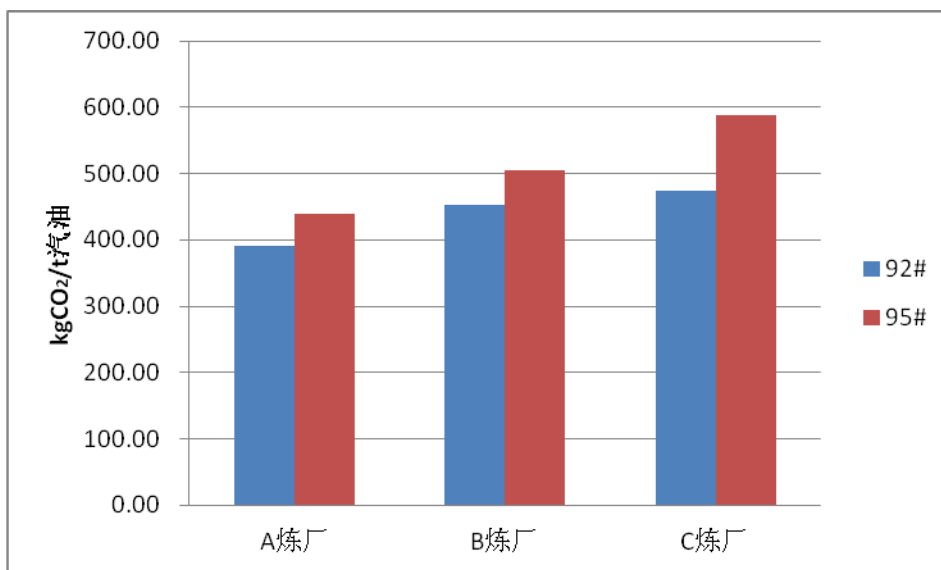


图 4.7 不同牌号汽油单位生产碳排放对比图

Fig. 4.7 Comparison chart of carbon emissions of gasoline from different refineries

由图 4.7 可知，汽油碳排放变化规律与其能耗变化规律类似，高标号 95#汽油单位生产碳排放比低标号 92#汽油单位生产碳排放高，主要原因是高标号汽油需要高能耗的高辛烷值组分调和。本文研究的 3 个炼厂 95#汽油比 92#汽油单位生产碳排放高平均高 71.2 kg，平均高出 16.2%。

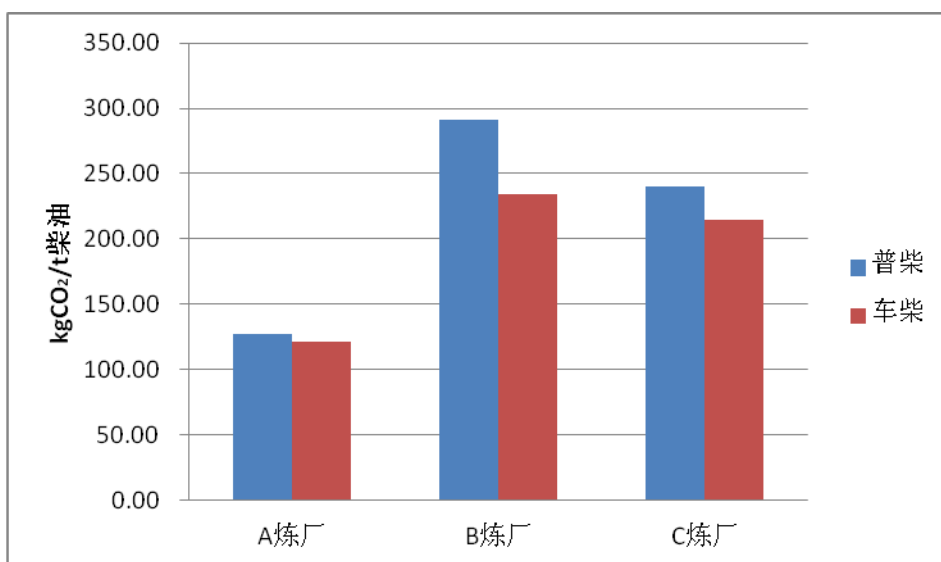


图 4.8 不同质量柴油单位生产碳排放对比图

Fig. 4.8 Comparison chart of carbon emissions of diesel from different refineries

由图 4.8 可知，柴油碳排放变化规律与其能耗变化规律也类似，普柴单位生产碳排放比车柴单位生产碳排放高，主要原因是普柴调和组分所经过的加工装置较车柴多，因此产生的碳排放多。本文研究的 3 个炼厂生产普柴比生产车柴单位碳排放平均高出 29.6 kg，平均高出 15.6%。

综合以上分析可知，炼厂加工流程不同，生产汽柴油单位碳排放不同，且生产汽油单位碳排放比柴油高，平均高出 132%。生产高标号汽油单位碳排放比低标号汽油平均高 16.2%；生产普柴单位碳排放比车柴平均高 15.6%。总体来看，加工流程简单的厂比加工流程复杂的厂生产汽柴油单位碳排放量少，而加工流程复杂度相当的炼厂之间碳排放也存在差异，主要与炼厂加工装置种类、装置能耗及炼厂碳排放因子有关。

### 4.5 本章小结

本章通过分析我国炼厂生产装置构成，结合汽柴油在炼厂生产阶段加工流程特点，灵活应用作业成本法和 Aspen PIMS 模型确定了炼厂生产阶段汽柴油产品能耗分配方法，并简单介绍炼厂碳排放因子的确定，从而给出汽柴油在炼厂生产阶段碳排放计算方法和模型。最后，选取三家典型炼厂进行案例分析，采用所建立的计算方法对各炼厂生产的汽柴油进行碳排放计算，分析汽柴油在不同炼厂生产碳排放特点，比较不同牌号汽油和不同质量柴油在炼厂生产阶段的碳排放情况。为汽柴油全生命周期碳排放分析计算奠定基础。通过本章计算得出结论，炼厂加工流程不同，生产汽柴油单位碳排放不同，生产汽油单位碳排放比柴油高，生产高标号汽油单位碳排放比低标号汽油高，生产普柴单位能耗比车柴高。



## 第 5 章 汽柴油全生命周期碳排放计算实例

### 5.1 引言

在本文第 3 章，确定了汽柴油各阶段主要碳排放来源及碳排放量计算公式，并对各阶段计算所需数据主要来源进行了简单叙述，第 4 章对炼厂生产阶段的碳排放计算方法进行详细叙述并对典型炼厂进行具体测算。本文将在第 4 章炼厂生产阶段碳排放数据测算的基础上，结合第 3 章汽柴油其他阶段生命周期计算方法对选定炼厂生产的不同品种牌号汽柴油进行全生命周期碳排放测算，并对 C 炼厂的测算结果进行分析，同时将 A、B 炼厂加工路线下汽柴油 WTW 各阶段碳排放计算结果列表给出，不进行具体分析。

### 5.2 WTT 阶段碳排放计算

#### 5.2.1 原油开采阶段

##### 5.2.1.1 单位原油开采碳排放

原油开采时的碳排放计算需要各开采使用技术装置的燃料类型、比例及装置燃烧技术碳排放因子，各燃烧技术碳排放因子难以确定，对于本阶段的单位原油开采碳排放计算，本文引用 GREET 模型中考虑国内外原油开采碳排放的单位原油开采阶段碳排放量数据，通过本文方法换算后计算得到开采 1 吨原油排放的平均 CO<sub>2</sub> 量为 36.38 kg，即原油单位开采能耗为 36.38 kg/t<sup>[24]</sup>。

##### 5.2.1.2 不同燃料产品开采阶段碳排放

依据国家统计局数据计算可得，2014 年我国生产 1 吨汽油平均消耗原油量为 4.71 t，生产 1 吨柴油平均消耗原油量为 2.95 t。根据公式 (3-1) 可分别计算出汽柴油在原油开采阶段的碳排放量，结果列于表 5.1。

表 5.1 开采阶段碳排放量

Table 5.1 Carbon emissions in oil exploration stage

	92#	95#	普柴	车柴
单位原油开采碳排放 (kg/t)	36.38	36.38	36.38	36.38
生产 1 t 汽油平均原油消耗量 (t/t)	4.17	4.17	-	-
生产 1 t 柴油平均原油消耗量 (t/t)	-	-	2.95	2.95
汽油开采阶段碳排放量 (kg/t)	171.35	171.35	-	-
柴油开采阶段碳排放量 (kg/t)	-	-	107.32	107.32

## 5.2.2 原油运输阶段

### 5.2.2.1 单位原油运输碳排放

原油运输阶段碳排放主要来源于各运输方式燃料燃烧所产生的碳排放，且需考虑运输方式所占比例、平均运距及各运输方式碳排放因子，本节根据 3.2.1 节所参考的数据计算出原油运输阶段各运输方式碳排放因子列于表 5.2。

表 5.2 原油运输参数及运输方式碳排放因子

Table 5.2 Carbon emissions in oil exploration stage

运输模式	比例 <sup>1)</sup>	平均运输距离 km	能源强度 kJ/(t·km)	运输方式碳排放因子 g/MJ
远洋	50.00%	11000	23	80.38
铁路	45.00%	950	240	41.12
管道	80.00%	500	300	39.50
水运	10.00%	250	148	75.12
短途公路	0.00%	0	1362	74.00

1) 运输方式占比之和超过 100%主要考虑国外原油运输。

2014 年进口原油和国产原油加工量为 51980.37 万吨，结合运输方式占比可计算每种运输方式的原油运输量，参考表 5-4 中数据及公式 (3-4) 计算可得 2014 年

运输 1 吨国内外原油运输碳排放量为 19.40 kg，即原油单位运输碳排放为 19.40 kg/t。

### 5.2.2.2 不同燃料产品原油运输阶段碳排放量

由 2014 年我国汽柴油平均原油消耗量，根据公式（3-3）可分别计算出汽柴油在原油运输阶段的碳排放量，结果列于表 5.3。

表 5.3 原油运输阶段碳排放量

Table 5.3 Carbon emissions in oil transportation stage

	92#	95#	普柴	车柴
单位原油运输碳排放 (kg/t)	19.40	19.40	19.40	19.40
生产 1 t 汽油平均原油消耗量 (t/t)	4.17	4.17	-	-
生产 1 t 柴油平均原油消耗量 (t/t)	-	-	2.95	2.95
汽油运输阶段碳排放量 (kg/t)	91.39	91.39	-	-
柴油运输阶段碳排放量 (kg/t)	-	-	57.24	57.24

### 5.2.3 炼厂生产阶段

汽柴油在炼厂生产阶段碳排放与不同炼厂加工流程及油品质量有关，本文对油品在汽柴油生产阶段碳排放进行重点研究。并以具体炼厂为实例进行计算，得出 A、B、C 三个加工流程不同的炼厂的不同牌号汽油和不同质量柴油的单位生产碳排放量。本节采用上章计算结果，不再重复计算。计算结果列于表 5.4。

表 5.4 炼厂生产阶段碳排放量

Table 5.4 Carbon emissions in fuel stage

	A 炼厂	B 炼厂	C 炼厂
92#汽油 (kg/t)	391.15	453.67	473.22
95#汽油 (kg/t)	438.69	505.11	587.86
普柴 (kg/t)	127.65	291.71	239.82
车柴 (kg/t)	121.24	234.71	214.34

## 5.2.4 成品油运输阶段

### 5.2.4.1 单位油品运输碳排放

单位油品运输碳排放计算方法与原油类似，不同之处在于成品油运输方式所占比例及平均运距与原油不同，因不考虑进出口汽柴油运输，其运输方式比例加和为 100%。原油运输阶段各运输方式参数及碳排放因子列于表 5.5。

表 5.5 成品油运输参数及运输方式碳排放因子

**Table 5.5 The parameters of oil products' transport and carbon emission factor of every transport mode**

运输模式	比例	平均运输距离 km	能源强度 kJ/(t·km)	运输方式碳排放因子 g/MJ
远洋	25.00%	7000	23	80.38
铁路	50.00%	900	240	41.12
管道	0.00%	160	300	39.50
水运	15.00%	1200	148	75.12
短途公路	10.00%	50	1362	74.00

2014 年我国汽油产量为 11029.85 万吨，柴油产量为 17635.34 万吨，结合运输方式占比可计算每种运输方式的总成品油运输量，参考表 5-9 中数据及公式(3-7)，在计算中考虑汽柴油热值不同（汽油热值 43.07 MJ/kg，柴油热值 42.65 MJ/kg），分别计算可得 2014 年单位汽油运输碳排放为 10.29 kg/t，单位柴油运输碳排放为 10.11 kg/t。

## 5.2.5 WTT 阶段碳排放计算结果及相关说明

### 5.2.5.1 WTT 阶段计算结果

综合上述各阶段碳排放计算结果，按 WTT 阶段碳排放计算公式（3-1）加和得到经过不同加工路线的不同牌号汽油和不同质量柴油在 WTT 各阶段的碳排放数据，将经过 A、B、C 各炼厂加工路线结果分别列于表 5.6、5.7 和 5.8。WTT 阶段碳排放量的单位是 kg/t。

表 5.6 A 炼厂 WTT 阶段碳排放结果(kg/t)

**Table 5.6 Carbon emission result of each WTT stage based on A refinery processing route**

	92#	95#	普柴	车柴
原油开采	171.35	171.35	107.32	107.32
原油运输	91.39	91.39	57.24	57.24
炼厂生产	391.15	438.69	127.65	121.24
油品运输	10.29	10.29	10.11	10.11
WTT 总排放量	664.18	711.72	302.32	295.91

表 5.7 B 炼厂 WTT 阶段碳排放结果(kg/t)

**Table 5.7 Carbon emission result of each WTT stage based on B refinery processing route**

	92#	95#	普柴	车柴
原油开采	171.35	171.35	107.32	107.32
原油运输	91.39	91.39	57.24	57.24
炼厂生产	453.67	505.11	291.71	234.71
油品运输	10.29	10.29	10.11	10.11
WTT 总排放量	726.70	778.14	466.38	409.38

表 5.8 C 炼厂 WTT 阶段碳排放结果(kg/t)

**Table 5.8 Carbon emission result of each WTT stage based on C refinery processing route**

	92#	95#	普柴	车柴
原油开采	171.35	171.35	107.32	107.32
原油运输	91.39	91.39	57.24	57.24
炼厂生产	473.22	587.86	239.82	214.34
油品运输	10.29	10.29	10.11	10.11
WTT 总排放量	746.25	860.89	414.48	389.01

## 5.2.5.2 WTT 阶段结果分析

以 C 炼厂生产为例，分析不同质量汽柴油上游生产阶段碳排放情况。C 炼厂 WTT 各阶段碳排放及情况如图 5-1 所示。图中用数据标签标出了 WTT 各阶段碳排放数据。

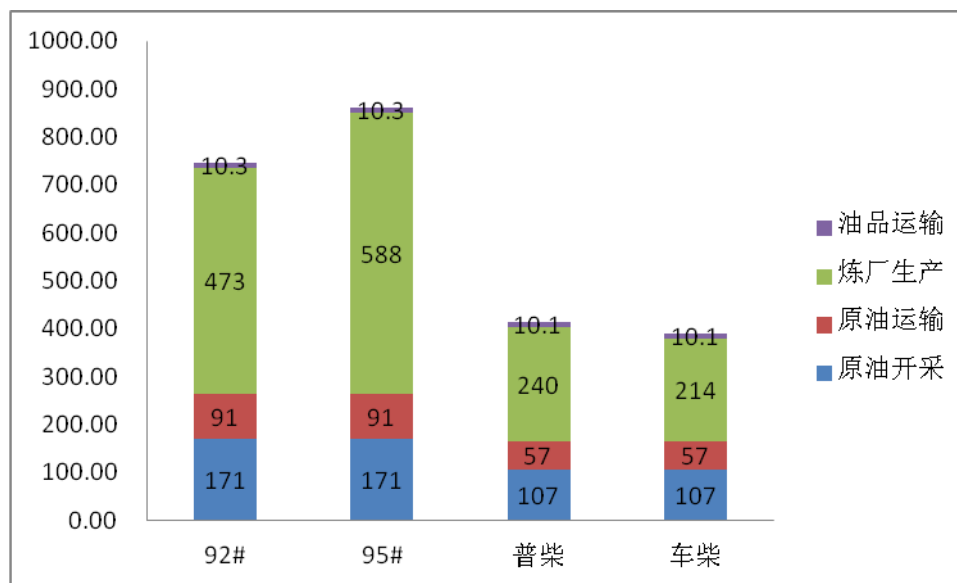


图 5.1 C 炼厂 WTT 各阶段碳排放情况

Fig. 5.1 Carbon emission of each WTT stage based on C

由图 5.1 可以看出，对于同种油品，因假定其热值及单位原油消耗量相同，在开采阶段和运输阶段其碳排放量相同，如在原油开采阶段，汽油的单位开采碳排放均为 10.3 kg。因此，92#和 95#汽油在 WTT 阶段碳排放差异为炼厂生产阶段的碳排放差异，C 炼厂生产 1 吨 95#汽油较生产 1 吨 92#汽油碳排放量多约 115 kg，碳排放量多约 24%；同样，生产 1 吨车柴和普柴的 WTT 阶段碳排放差异也为炼厂生产阶段的碳排放差异，C 炼厂生产 1 吨普柴比生产 1 吨车柴碳排放量多约 26 kg，碳排放量多约 12%。

而对于不同种油品之间，生产 1 吨汽油和柴油的 WTT 阶段碳排放差距由于柴油热值及平均生产原油消耗量较汽油低，使得其在开采阶段和运输阶段的碳排放均比汽油少，因此 WTT 阶段不同油品之间的碳排放量差距增大，汽油比柴油碳排放量多更多，比如，C 炼厂在生产阶段生产 1 吨 92#汽油的碳排放量比车柴多 259 kg，而在 WTT 阶段生产 1 吨 92#汽油的碳排放量比车柴多 357.24 kg。

综合分析 WTT 阶段生产 1 吨油品的碳排放量，主要结论是汽油 WTT 阶段碳排放与柴油 WTT 阶段碳排放量差距增大，而同种油品之间的碳排放差距即是炼厂生产阶段的碳排放差距。即 95#汽油 WTT 阶段碳排放比 92#汽油高，普柴 WTT 阶段碳排放比柴油高。

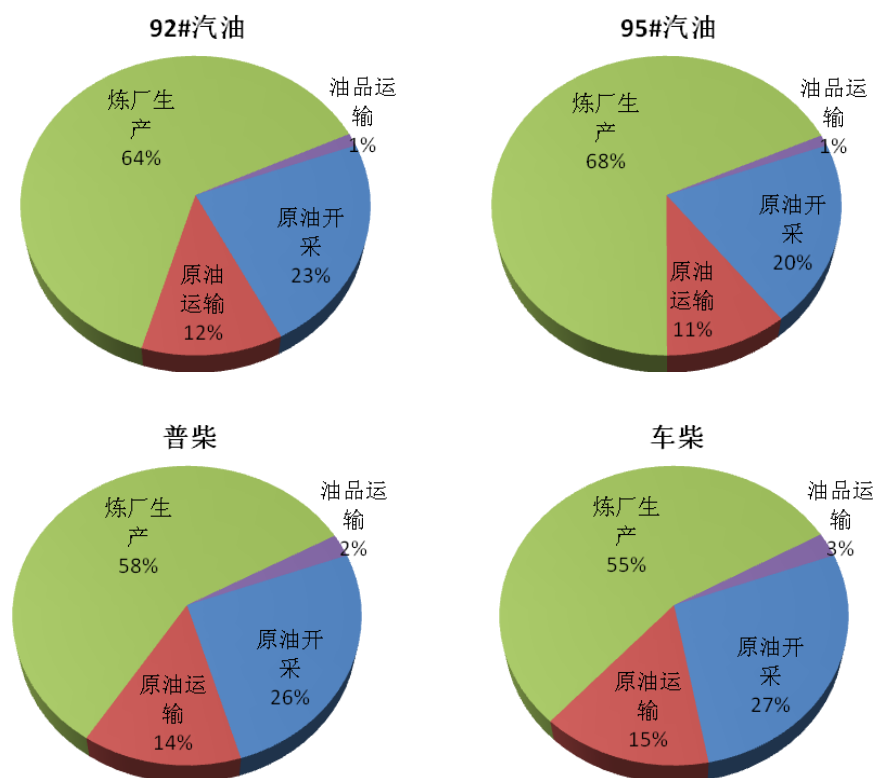


图 5.2 C 炼厂 WTT 阶段碳排放占比图

Fig. 5.2 The proportion of each WTT stage based on C refinery

由图 5-2 可以看出，炼厂生产阶段碳排放在汽柴油 WTT 阶段碳总量中占比最高，汽油生产阶段碳排放平均占 WTT 阶段碳排放的 66%，柴油平均占 56.5%，汽油比柴油高出 10%左右。其次是开采阶段碳排放占比较高，汽油在开采阶段碳排放平均占比占比约 21.5%，柴油为 26.5%，比汽油稍高。占比最小的是成品油运输阶段碳排放。

### 5.3 TTW 阶段碳排放计算结果及相关说明

结合不同质量油品在汽车使用阶段的油耗量及油品性质数据，按照公式(3-9)计算可得不同牌号汽油在汽车使用阶段的碳排放数据列于表 5.9。计算基准为汽车行驶 1km 所消耗的汽柴油燃烧产生的碳排放量，单位为 g/km。

表 5.9 汽车使用阶段碳排放计算结果

Table 5.9 Carbon emissions in vehicle using stage

	92#	95#	普柴	车柴
百公里汽车油耗, L/100km	8.14	7.93	6.42	5.70
密度, g/m <sup>3</sup>	0.75	0.75	0.85	0.84
百公里汽车油耗, kg/100km	6.08	5.97	5.44	4.76
低热值, MJ/L	32.65	32.75	36.64	36.84
汽车排放因子, g/MJ	69.30	69.30	74.10	74.10
汽车百公里碳排放, g/km	184.2	180.0	174.3	155.6

由表 5.9 可知，排量相同的汽油车比柴油油耗低 30% 左右，因此汽油在燃料使用阶段的碳排放比柴油多 10% 左右，平均多出 17.2 g 的碳排放。

在汽车使用阶段，对于同一汽油车，95#汽油因耗油量比 92#汽油少，热值比 92#汽油低，从而在汽车使用中产生的碳排放也少，95#汽油比 92#汽油汽车行驶 1 km 时燃烧产生的碳排放少 4.2g；对于同一柴油车，使用车柴比使用普柴的油耗量少，虽热值比车柴稍高，但在汽车使用中产生的碳排放仍比普柴少，车柴比普柴在汽车行驶 1 km 时燃烧产生的碳排放少 18.7 g。

综述，在汽车使用阶段，汽车行驶 1 km 的产生的碳排放汽油比柴油，92#汽油比 95#汽油多，普柴比车柴碳排放多。

### 5.4 WTW 阶段碳排放计算结果及相关说明

#### 5.4.1 WTW 阶段碳排放计算结果

WTW 阶段通过汽车油耗将 WTT 阶段与 TTW 阶段结合，计算得到 A、B、C 炼厂的汽柴油 WTW 碳排放计算结果如表 5.10、表 5.11 和表 5.12 所示，单位为 g/km。



表 5.10 A 炼厂 WTW 阶段碳排放结果(g/km)

**Table 5.10 Carbon emission result of each WTW stage based on A refinery processing route**

	92#	95#	普柴	车柴
原油开采	10.42	10.23	5.84	5.11
原油运输	5.56	5.46	3.11	2.72
炼厂生产	23.78	26.19	6.94	5.77
油品运输	0.63	0.61	0.55	0.48
汽车使用	184.18	180.03	174.28	155.60
WTW 阶段	224.56	222.51	190.72	169.68

表 5.11 B 炼厂 WTW 阶段碳排放结果(g/km)

**Table 5.11 Carbon emission result of each WTW stage based on B refinery processing route**

	92#	95#	普柴	车柴
原油开采	10.42	10.23	5.84	5.11
原油运输	5.56	5.46	3.11	2.72
炼厂生产	27.58	30.15	15.86	11.17
油品运输	0.63	0.61	0.55	0.48
汽车使用	184.18	180.03	174.28	155.60
WTW 阶段	228.36	226.48	199.64	175.09

表 5.12 C 炼厂 WTW 阶段碳排放结果(g/km)

**Table 5.12 Carbon emission result of each WTW stage based on C refinery processing route**

	92#	95#	普柴	车柴
原油开采	10.42	10.23	5.84	5.11
原油运输	5.56	5.46	3.11	2.72
炼厂生产	28.77	35.09	13.04	10.20
油品运输	0.63	0.61	0.55	0.48
汽车使用	184.18	180.03	174.28	155.60
WTW 阶段	229.55	231.42	196.82	174.12

5.4.2 WTW 阶段结果分析

本文以 A、C 炼厂加工路线生产的汽柴油为主进行 WTW 阶段碳排放分析。由以上计算结果可得出 A、C 炼厂生产不同品种牌号油品在 WTW 阶段碳排放数据图如图 5.3、5.4 所示，数据标签分别代表油品在每一阶段碳排放量，单位为 g/km。

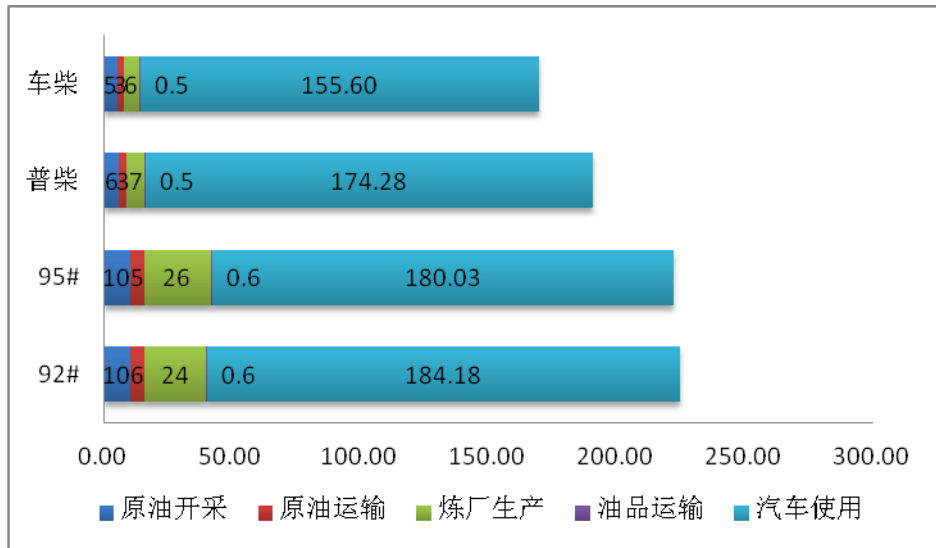


图 5.3 A 炼厂 WTW 阶段碳排放情况

Fig. 5.3 Carbon emission of each WTW stage based on A refinery processing route

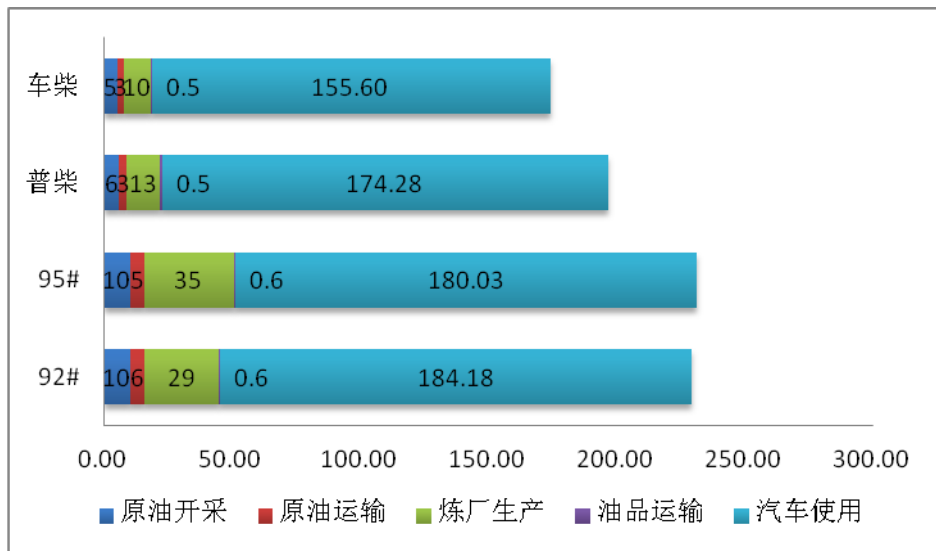


图 5.4 C 炼厂 WTW 阶段碳排放情况

Fig. 5.4 Carbon emission of each WTW stage based on C refinery processing route

由图 5.3、5.4 可知，由于加工流程不同，A 炼厂比 C 炼厂各油品 WTW 碳排放少很多，主要差异产生于炼厂生产阶段，油品经过加工流程简单的 A 炼厂比经过加工流程复杂的 C 炼厂碳排放少很多。

对于同一炼厂，汽油 WTW 碳排放量要比柴油 WTW 碳排放量高，造成这一差异的原因存在于汽油和柴油生产的各个阶段，主要差异产生于炼厂生产阶段和汽车使用阶段。在炼厂生产阶段，由于柴油调和组分较汽油种类少，柴油加工流程比汽油简单，因此在生产阶段柴油的碳排放量较汽油少；在汽车使用阶段，由于柴油车采用压燃式发动机，在相同动力情况下柴油车油耗较汽油车少 30% 左右，虽柴油碳排放因子稍高于汽油，但在汽车使用阶段柴油比汽油的碳排放少；在原油开采和运输阶段，由于柴油生产效率高，生产 1 吨柴油的平均原油消耗量较汽油低，因此造成柴油在原油开采及运输阶段的碳排放量较汽油少。

对于经过同一炼厂生产的 92#汽油和 95#汽油的 WTW 碳排放，其结果存在不确定性。如 A 炼厂生产的 92#汽油比 95#汽油 WTW 碳排放量稍高，而 C 炼厂生产的 92#汽油比 95#汽油 WTW 碳排放量低。产生这一现象的原因是，在燃料生产阶段，低标号的 92#汽油比高标号的 95#汽油的碳排放低，而在汽车使用阶段，因产生同等动力性能时高标号汽油油耗少造成低标号的 92#汽油比高标号的 95#汽油的碳排放高，因此 WTW 的不同标号汽油碳排放比较受燃料加工和汽车使用两方面因素的影响。

对于同一炼厂生产的普柴和车柴，普柴 WTW 碳排放比车柴高。产生这一差异的原因主要存在于炼厂生产和汽车使用阶段。在炼厂生产阶段，车柴因加工流程简单而产生的碳排放少，在汽车使用阶段，因同一柴油车使用车柴油耗量比普柴少而使其在这一阶段碳排放少。

对比图 5.5 和 5.6 可知，炼厂生产阶段占比随加工流程的不同而不同，汽柴油在炼厂生产过程中加工路线越复杂，其在 WTW 阶段碳排放中比例越高。如 C 炼厂生产的汽油占比比 A 炼厂加工路线下平均多 5.3%，柴油平均多 5.5%。同一炼厂汽油比柴油占比高一倍左右，95#汽油比 92#汽油占比高，普柴比车柴占比高。

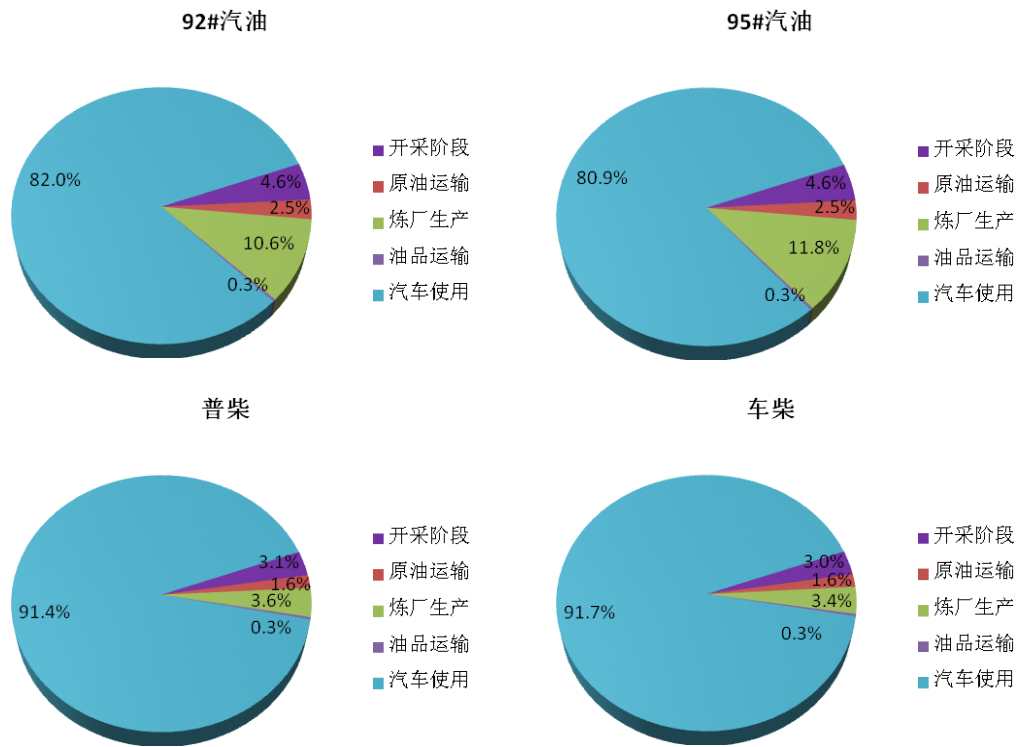


图 5.5 A 炼厂 WTT 阶段碳排放占比图

Fig. 5.5 The proportion of each WTW stage based on A refinery processing route

总的来说，汽车使用阶段是对汽柴油全生命周期碳排放量影响最大的阶段，按本文计算方法，汽油在汽车使用阶段的碳排放约占 WTW 的 80%左右，柴油在汽车使用阶段碳排放约占 WTW 的 90%左右。其次是炼厂生产阶段，汽油在本阶段占比在 10%以上，柴油占比小于 10%。虽然炼厂生产阶段的占比远远小于汽车使用阶段的占比，但是不同炼厂加工流程、不同油品在炼厂生产阶段的碳排放存在较大差异，也需要用相对合适的方法进行计算。占比最小的是成品油运输阶段。

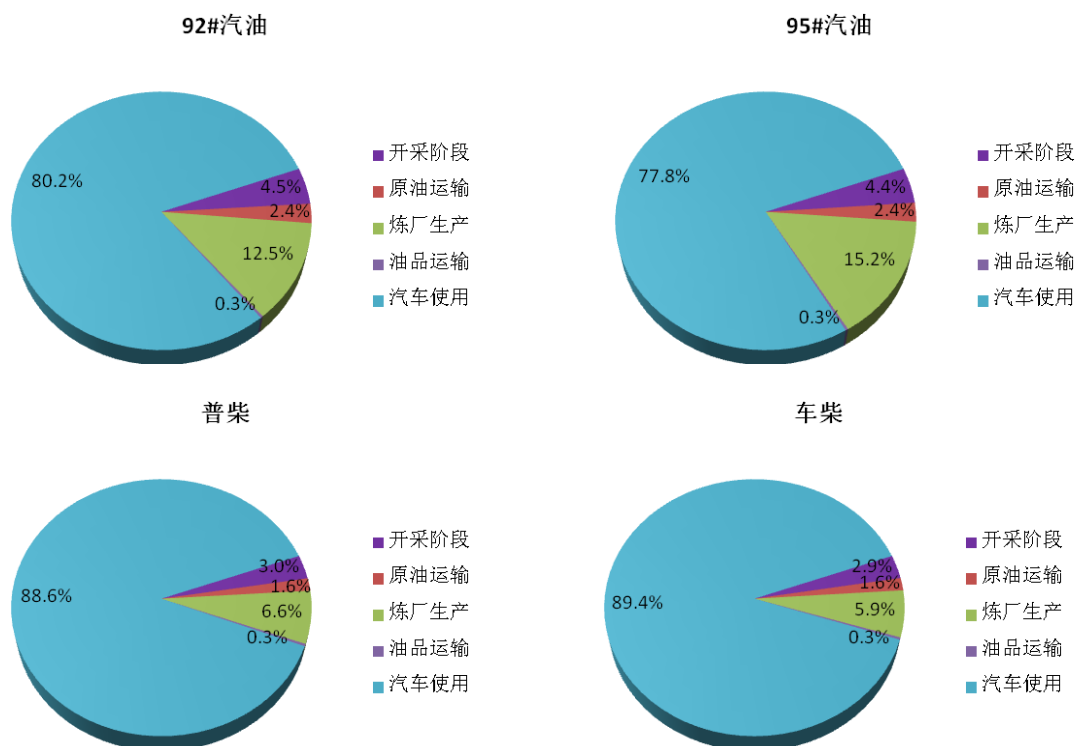


图 5.6 C 炼厂 WTT 阶段碳排放占比图

Fig. 5.6 The proportion of each WTW stage based on C refinery processing route

## 5.5 本章小结

本章结合第 3 章汽柴油各生命周期碳排放计算方法和数据，借用第 4 章汽柴油在炼厂生产阶段的碳排放计算结果，对经过 A、B、C 炼厂不同加工流程的汽柴油全生命周期碳排放量进行计算，从而得出结论。汽车使用阶段是对汽柴油全生命周期碳排放量影响最大的阶段，特别是柴油，在基于作业成本法计算产品碳排放的基础上，柴油在炼厂生产阶段的碳排放量少，因而其汽车使用阶段碳排放占比相对会更高一些。其次是炼厂生产阶段碳排放占比较高，占比最小的是成品油运输阶段。

## 第6章 结论与展望

### 6.1 结论

本文基于全生命周期理论，首先对碳排放计算方法和产品生命周期碳排放计算国内外标准进行简单介绍，然后通过对汽柴油全生命周期不同阶段碳排放来源的确定分析各阶段碳排放特点，结合碳排放计算方法和全生命周期评价理论建立汽柴油各生命周期阶段碳排放计算方法和模型，并通过 WTT 和 TTW 阶段计算逻辑的分析给出各阶段计算所需数据种类及来源。考虑到汽柴油在炼厂生产阶段的特点，对炼厂生产阶段采用作业成本法进行碳排放计算方法和模型的确立。最后利用建立的模型，选取三家典型炼厂，计算汽柴油产品全生命周期各个阶段的碳排放量，同时重点比较、分析炼厂生产及汽车使用阶段碳排放对其全生命周期碳排放的影响，最后得出结论。

(1) 在炼厂生产阶段，炼厂加工流程不同，生产汽柴油单位碳排放不同。其中生产汽油单位碳排放比柴油高出一倍多；生产高标号汽油单位碳排放比低标号汽油碳排放量高；生产普柴单位碳排放比车柴高。

(2) 在 WTT 上游阶段，炼厂生产阶段碳排放占比最高。从三个炼厂的测算结果来看，汽油在生产阶段碳排放平均占 WTT 阶段碳排放的 66%，柴油平均占比为 56.5%，汽油比柴油高出 10% 左右。其次是开采阶段碳排放占比较高，汽油在开采阶段碳排放平均占比约 21.5%，柴油为 26.5%，比汽油稍高。占比最小的是成品油运输阶段碳排放。

(3) 在 TTW 阶段，动力相当的情况下，汽车同样行驶 1 km，汽油车所产生的碳排放比柴油车多。因油耗差异，使用 92# 汽油比 95# 汽油碳排放多，普柴比车柴碳排放多。

(4) 在 WTW 阶段，较为简单的炼厂生产单位产品的碳排放比加工流程复杂的炼厂低；对于同一炼厂，汽油 WTW 碳排放量要比柴油 WTW 碳排放量高，造成这一差异的主要原因是炼厂生产阶段和汽车使用阶段碳排放不同。

(5) 对于同一炼厂生产的 92# 汽油和 95# 汽油的 WTW 碳排放，其结果存在不确定性。产生这一现象的原因是，在炼厂生产阶段，低标号的 92# 汽油比高标号的 95# 汽油的碳排放低，而在汽车使用阶段，因同一汽车使用较高牌号汽油油耗少而使得在这一阶段，低标号的 92# 汽油比高标号的 95# 汽油的碳排放高，因此不同标号汽油的 WTW 的碳排放受炼厂生产和汽车使用两方面因素的影响。对于同一炼厂生产的普柴和车柴，普柴 WTW 碳排放比车柴高。

(7)分析汽柴油 WTW 各阶段碳排放情况,可知汽车使用阶段是汽柴油 WTW 碳排放量最大的阶段。按本文计算方法,通过对三家炼厂测算得到汽油在汽车使用阶段的碳排放约占 WTW 的 80%左右,柴油在汽车使用阶段碳排放约占 WTW 的 90%左右。其次是炼厂生产阶段,汽油在本阶段占比在 10%以上,柴油占比小于 10%。

## 6.2 工作展望

汽柴油全生命周期碳排放计算需要的数据很多,数据的准确性及适用性是计算的关键。本论文因研究时间有限,需要改进及完善的地方还有很多。从本论文的研究进展出发,结合有关方面的研究现状,对汽柴油全生命周期碳排放研究提出以下展望:

(1) 根据我国原油开采、运输、油品生产及汽车使用特点,建立符合我国油品生产现状的碳排放因子数据库,并不断更新。碳排放因子是进行汽柴油各阶段碳排放计算的主要数据。因研究时间有限,本论文中原油开采阶段、油品运输阶段及汽车使用阶段的碳排放因子均是在阅读大量文献和统计资料的基础上,引用得到。对于开采阶段,不同油田使用的开采技术不同,所用设备不同,燃料动力不同,各装置碳排放因子不同,我国对于原油开采阶段的碳排放数据统计不足,需加强研究。对于原油和油品运输阶段,不同运输方式所占比例会发生变化,交通运输工具随着技术的发展碳排放因子也随着变化,需及时更新。在汽车使用阶段,不同质量油品在车辆运行中的碳排放因子数据的相关试验或实测数据很少,需进一步完善。因此,对于油品碳排放计算,我国需要在大量基础研究的基础上建立符合我国生产状况的完善的碳排放因子数据库。

(2) 国外已有相关油品碳排放计算软件,但其数据库基本是基于国外油品生产技术及特点建立的,对于我国不太适用。本论文只是在研究的基础上对油品各阶段碳排放算法进行分析,并未进行适用性更广更方便的软件开发研究。在以后的研究过程中,可以根据我国碳排放因子数据库研究的研究进展开展油品生产碳排放计算软件的开发工作。

(3) 因时间有限,本论文在方法研究的基础上只选取三个典型炼厂开展石油基汽柴油全生命碳排放计算。后续研究中可以采用本文燃料生产阶段碳排放计算思路对不同种类的汽柴油,如各种生物燃料等进行生产阶段细化的碳排放计算,也可以对不同质量油品的碳排放进行分析计算。在此基础上,对不同加工流程不同品种牌号油品进行更细致的碳排放分析,为生产企业对产品碳排放情况掌控提供依据,也为汽柴油产品碳标签及碳税的发展奠定基础。

## 参考文献

- [1] 秦大海. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(07): 874.
- [2] 丁金光. 巴黎气候变化大会与中国的贡献[A]. 公共外交季刊(2016年第1期春季号)[C]. 2016: 9.
- [3] IEA. 2015 Key World Energy Statistics[R]. International Energy Agency, 2015.
- [4] 张翼. “十二五”期间非化石能源消费比重提高[N]. 光明日报, 2016-1-5(3).
- [5] 陈耀龙. 中国汽车产业低碳化转型研究[D]. 暨南大学, 2011: 1-2.
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社, 2006~2015. .
- [7] 李振宇, 卢红, 朱庆云, 王春娇. 我国未来汽柴油消费需求预测[J]. 中国能源, 2014, 08: 34-39.
- [8] 程薇等. 面向低碳排放的炼油技术进展——2010年 NPRA 年会综述[J]. 石油炼制与化工, 2010(09): 2-3.
- [9] 罗艳托, 徐英俊, 汤湘华, 李永昌. 国内车用替代燃料的发展前景[J]. 国际石油经济, 2013, 10: 77-86+112.
- [10] Delucchi M A. 1993 Emissions of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity –Volume 1: Main Text.ANL. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory.
- [11] General Motors Corporation, Argonne National Laboratory, BP, ExxonMobil, and Shell. Well-to-wheel energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems-north american analysis[R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 2001.
- [12] Kourosh Vafi, Adam R. Brandt. Greenhouse gas emissions from oil production: Insights from an open-source modeling effort[R]. Department of Energy Resources Engineering Stanford University, 2013.
- [13] Kenneth D Rose. Fuel Quality Issues and European Research[R]. CONCAWE. Technical Coordinator, Fuels and Emissions, 2012.
- [14] Report of CO<sub>2</sub> Emissions Study Group. Study on CO<sub>2</sub> Emissions from automobiles and refineries[R]. JCAP II, 2005.
- [15] 欧训民, 张希良. 中国终端能源的全生命周期化石能耗及碳强度分析[J]. 中国软科学, 2009, S2: 208-214.
- [16] 丁宁, 杨建新. 中国化石能源生命周期清单分析[J]. 中国环境科学, 2015, 05: 1592-1600.
- [17] 李宏刚. 多种车用能源与车辆的油井到车轮(WTW)评价研究[D]. 吉林大学, 2006.
- [18] 宋雯, 郭家强, 王成. 基于 WTW 燃料循环分析的中国煤基车用燃料能量消耗和二氧化碳排放研究[J]. 汽车技术, 2008, 01: 5-9.
- [19] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 董尧清. 柴油及其替代燃料生命周期排放评价[J]. 内燃机工程, 2007, 03: 80-84.
- [20] 黄志甲, 张旭. 汽车燃料的生命周期评价模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 12: 1472-1476.



- [21] 高有山, 李兴虎. 大型客车柴油燃料生命周期分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 11: 1349-1352.
- [22] 顾道金. 建筑环境负荷的生命周期评价[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [23] ISO/TR 14069-2013, 温室气体.组织机构应用 ISO 14064-1 标准导则的温室气体排放量化和报告[S].
- [24] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 02: 248-258.
- [25] 刘娜. 建筑全生命周期碳排放计算与减排策略研究[D]. 石家庄铁道大学, 2014.
- [26] 魏丹青, 赵建安, 金迁致. 水泥生产碳排放测算的国内外方法比较及借鉴[J]. 资源科学, 2012, 06: 1152-1159.
- [27] 尹志东. 煤炭产品碳排放核算及减排途径研究[D]. 首都经济贸易大学, 2015.
- [28] API. Compendium of Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry[S]. American Petroleum Institute, 2009.
- [29] 孟宪玲. SH/T 5000-2011, 《石油化工生产企业 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法》[S]. 中华人民共和国工业和信息化部, 2011.
- [30] 高有山, 王爱红, 高崇仁, 陶元芳. 原油运输能量消耗及气体排放分析[J]. 机械工程学报, 2012, v.4820: 150-155.
- [31] 张茜. 基于生命周期评价理论的车用替代燃料路径选择研究[D]. 天津大学, 2012.
- [32] Ou XM, Zhang XL, Chang SY. Life-cycle Analysis of Energy Consumption, GHG Emissions and Regulated Pollutants Emissions of Automotive Fuel Pathways in China[R]. Beijing: Center of Automotive Energy Research Center, Tsinghua University, 2008.
- [33] 吴银山, 林寅, 林枫. 柴油车与汽油车的排气污染和其它性能比较[J]. 环境, 2008, S1: 42-44.
- [34] 田家栋. 汽车发动机发展现状及未来发展趋势[J]. 黑龙江科学, 2014, v.507: 227.
- [35] 帅石金, 李昕晏, 王银辉, 付海超. 辛烷值对现代汽油车油耗与排放影响的整车试验[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, v.502: 172-179.
- [36] 陈文淼, 吴复甲, 王建昕, 帅石金. 十六烷值对欧-IV柴油机燃烧与排放性能的影响[J]. 内燃机工程, 2008, v.29; No.13106: 1-5.
- [37] 冯湘生, 徐燕声, 王锡础. 提高汽油辛烷值,降低汽车油耗的试验[J]. 石油炼制与化工, 1985, 01: 38-43.
- [38] 赵良, 王桂明, 朱军. 汽油辛烷值对车辆性能的影响[A]. 汽车工艺与材料, 2005, 02: 38-40.
- [39] 项颖, 赵德全, 吕维钺, 马洪亮. 燃油添加剂对铁路用柴油机油耗影响初探[J]. 中国铁道科学, 2001, 04: 35-38.
- [40] 关敏, 王凤滨, 高俊华. SCR 系统国 V 柴油机适用基准燃油的排放试验研究[J]. 汽车工程, 2014, 03: 273-276+320.
- [41] Amit Garg. 《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南——第 2 卷: 能源》[S]. 2006.
- [42] 国五车用汽油标准. <http://baike.so.com/doc/8392040-8710816.html>.
- [43] 郭莘. 中国汽油质量升级现状分析及发展建议[J]. 石油商技, 2013, 03: 4-11.

- [44] 龚慧明. 中国汽柴油标准现状及改善油品质量面临的挑战[J]. 国际石油经济, 2013, 05: 53-57+111.
- [45] GB 17930-2013, 中华人民共和国国家标准—《车用汽油》[S]. 中华人民共和国标准委员, 2013.
- [46] 司云航, 朱玉琴, 邹蓉梅, 郭凡, 王嘉春. 我国车用柴油标准现状及发展趋势[J]. 石油与天然气化工, 2014, 01: 82-86.
- [47] GB 19147-2013. 中华人民共和国国家标准—《车用柴油》[S]. 中华人民共和国标准委员, 2013.
- [48] GB 252-2015. 中华人民共和国国家标准—《普通柴油》[S]. 中华人民共和国标准委员, 2015.
- [49] 宁亚平. 作业成本法适用条件调查研究[J]. 财政研究, 2012, 03: 79-82.
- [50] 郭春明. 基于作业成本法的产品全生命周期成本估算研究[D]. 南京理工大学, 2005.
- [51] 胡怀敏. 炼油企业级 PIMS 模型应用探讨[J]. 当代石油化工. 2007, 15(4): 27-37.
- [52] 王迪. 石油企业环境完全成本核算方法与应用研究[D]. 清华大学, 2008.
- [53] 郭锦标. 线性规划技术在石油化工行业的应用[J]. 计算机与应用化学. 2004, 21(1): 1-5.
- [54] 郭锦标. 杨明诗. 生产经营计划与调度的优化[M]. 北京: 化学工业出版社. 2006.
- [55] 高礼杰. PIMS 模型在进口原油采购和配置优化方面的应用[J]. 当代石油石化. 2012, 5: 28-30.
- [56] 王景芳, 张国兴, 李咏梅. PIMS 模型开发与应用[J]. 化工自动化仪表. 2002, 29(2): 38-42.
- [57] Symonds GH. Linear programming solves gasoline refining and blending problems. Ind Eng Chem. 1956, 48 (3).
- [58] 洪鹰. 应用 PIMS 软件优化生产计划[J]. 石化技术, 2005, 12(3): 45-48.
- [59] 刘歌颂, 陈国忠. 炼化一体 PIMS 模型的应用探讨[J]. 当代石油石化. 2004, 12(7): 20-25.
- [60] 张红荣. 利用过程工业优化技术提升中国石化供应链管理水平[J]. 当代石油石化. 2003, 11(7): 28-3

## 致 谢

本论文是在刘灵丽教授级高工和刘坚教授的精心指导下完成，从论文项目初选、论文开题、论文提纲的拟定到初稿的修改，老师都非常用心地指导，付出了大量的时间和精力，用胜于言语的行动给予自己最大的帮助。古语有云，圣人行不言之教。三年的研究生生涯，与两位老师朝夕相处，他们细致严谨的治学态度和勤奋负责的工作作风，为我树立了终身学习的榜样和楷模。他们让我坚信，心中有光的人，终会冲破一切黑暗和荆棘，到达理想的彼岸。激励着我在未来的人生道路上，披荆斩棘，奋勇前行，为美好人生而奋斗。值此成文之际，我谨在此对恩师表示最诚挚的敬意和最衷心的感谢。

本课题研究是依托中国石化经济技术研究院优化咨询中心项目完成的，在此我必须对中国石化经济技术研究院的所有领导、前辈、老师和同事表达我深深的谢意，感谢你们两年来对我们学业的大力支持和热心帮助。特别是在论文完成过程中给予我很大帮助的施大鹏老师、高礼杰老师和王华老师，在论文软件学习过程中指导和帮助我很多。是这个家一样的集体，给我提供了学习的平台和最贴近生产实际的项目课题，让我得以完成论文研究，并顺利毕业。也感谢中国石油大学（北京），感谢理学院的各位领导，提供给我这样宝贵的学习和成长机会！

特别的，我还要感谢我的父母，感谢他们对我一直以来的关心、理解与支持！最后，再次感谢所有帮助过我的老师、前辈、同学和朋友们，谢谢！