

# 制造过程低碳优化 模型及应用

杨海东 刘国胜 郭建华 杨 春 陈 新 著



科学出版社

# 制造过程低碳优化 模型及应用

杨海东 刘国胜 郭建华 杨 春 陈 新 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是对作者近些年来在制造过程低碳化方面研究成果的总结,着重介绍制造过程低碳优化理论、优化模型和技术、低碳优化系统及其在实际工程领域的应用,主要内容包括制造过程低碳优化相关理论、置换流水车间低碳调度模型、混合流水车间低碳调度模型、分布式流水车间低碳调度模型、碳效优化流水车间调度模型、制造过程低碳异常检测模型以及制造过程低碳优化系统设计与应用。

本书可作为高等学校机械设计与制造、工业工程、信息管理与信息系统等专业研究生教材,也可作为高年级本科生选读课本和相关企业、科研机构专业人员的培训教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

制造过程低碳优化模型及应用/杨海东等著. —北京:科学出版社,2014.1  
ISBN 978-7-03-039107-0

I. ①制… II. ①杨… III. ①制造过程-节能-优化模型-研究 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 267474 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:彭 涛  
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



2014 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:274 680

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

随着全球气候变暖和能源价格不断攀升,人们逐渐意识到节约资源、保护环境的重要性,并且开始探索节能低碳的可持续发展模式。如何降低制造过程能源消耗和温室气体排放是工业企业面临的重要问题,目前,国内外对这一领域的研究尚处于起步阶段,没有成熟的理论框架和指导方法。本书对制造过程低碳优化理论进行研究,分析了制造过程能耗构成、能效影响因素、节能减排的实现途径;以高效低碳为目标建立了流程生产中的调度模型、目标级联模型和异常检测模型,并采用启发式算法和仿生算法进行求解;本书还结合作者近年来在企业能源管理和优化方面积累的经验和知识,通过轮胎行业为实施案例向读者介绍实现制造过程低碳优化系统的技术实现和应用等。

本书致力于为机械设计与制造、工业工程、信息管理与信息系统等相关专业的高年级学生和从事生产实践的企业管理人员、技术人员提供一本较为全面的制造过程低碳优化领域的参考书。全书共八章内容,主要涵盖制造过程低碳优化理论、优化方法和技术实现三个部分。本书在编写过程中始终把握以下几个原则:

(1) 以理论为基础。书中第 2 章全面介绍了制造过程低碳优化的相关理论,分析制造过程碳排放的主要影响因素和实现途径,介绍了目前对能源效率较为科学、系统的评估方法,包括经济效率评估、能量流评估、碳足迹评估和生命周期评估四种主要方法,形成了一套比较系统、完备的理论框架。

(2) 以方法为重点。书中第 3、4 章探讨通过低碳调度方法降低流水车间制造过程能源消耗和碳排放量,采用启发式算法和仿生算法对置换流水车间和混合流水车间低碳调度模型进行优化;第 5、6 章探讨通过目标级联法降低车间能源消耗和碳排放量,对生产计划进行优化排产以使得生产设备得到合理利用;第 7 章探讨通过能耗异常检测方法提高企业生产管理水平,采用回归方法对车间设备能耗数据进行实时监测,及时发现能耗使用故障,间接提高能源使用效率。所提出的模型从不同角度和层次阐述了实现制造过程高效低碳运行的优化手段。

(3) 以应用为目标。书中第 8 章结合作者多年来在能源管理方面的实施经验,分析典型低碳优化系统的整体需求、总体设计、数据处理和模型库设计等,介绍能耗数据采集、处理、监控和智能决策方面的内容,给出广州丰力橡胶轮胎有限公司和惠州仲恺高新技术产业开发区的区域能源管理、优化实施案例。

本书在编写过程中,得到了广东工业大学 CIMS(computer integrated manufacturing systems)重点实验室的同行和专家、广州丰力橡胶轮胎有限公司、惠州仲

恺高新技术产业开发管理委员会以及华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室的大力支持,同时为本书的成功出版付出辛苦努力的还包括香港大学黄国全教授、广东工业大学屈挺教授,华南理工大学研究生杨淑爱、郑庆仁等,广东工业大学研究生唐万和、朱成就、蒋攀等,在此一并表示感谢。

本书的出版得到了国家科技支撑计划课题(课题编号:2012BAF02B04、2012BAF12B10)、广东省重大科技专项(项目编号:2012A080104022、2011A080803010)、广东省教育部产学研结合项目(项目编号:2011A090200050、2012B091100365)和广东省科技计划项目(项目编号:2012B010500027)的资助。

制造过程低碳优化是一个多学科交叉领域,且出现较晚,对此领域研究尚且不多,本书为一次大胆探索和尝试。鉴于作者水平和经验有限,书中难免会有疏漏之处,敬请读者予以批评指正。

杨海东

2013年1月于广州

# 目 录

## 前言

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论            | 1  |
| 1.1 研究背景            | 1  |
| 1.2 制造过程低碳优化研究现状    | 8  |
| 1.2.1 低碳制造的提出       | 8  |
| 1.2.2 制造过程碳排放定量分析方法 | 8  |
| 1.2.3 制造过程低碳优化技术    | 10 |
| 1.2.4 制造过程低碳优化模型    | 11 |
| 1.3 制造过程低碳优化系统      | 13 |
| 1.4 低碳制造相关政策        | 16 |
| 1.5 本书架构与主要内容       | 18 |
| 1.6 本章小结            | 19 |
| 第 2 章 制造过程低碳优化相关理论  | 20 |
| 2.1 制造过程低碳优化的内涵     | 20 |
| 2.2 制造过程能耗影响因素分析    | 22 |
| 2.3 制造过程低碳优化的实现途径   | 23 |
| 2.4 制造过程能效评估方法      | 25 |
| 2.4.1 能源经济效率评估方法    | 25 |
| 2.4.2 能量流评估方法       | 28 |
| 2.4.3 碳足迹评估方法       | 29 |
| 2.4.4 生命周期评价方法      | 31 |
| 2.5 轮胎制造过程低碳优化案例分析  | 35 |
| 2.5.1 轮胎制造工艺概述      | 35 |
| 2.5.2 轮胎制造过程中的能量流动  | 36 |
| 2.5.3 轮胎制造过程能耗影响因素  | 37 |
| 2.5.4 轮胎制造过程能效计算方法  | 40 |
| 2.6 本章小结            | 41 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第 3 章 置换流水车间低碳调度模型</b>    | 42 |
| 3.1 引言                       | 42 |
| 3.1.1 问题描述                   | 42 |
| 3.1.2 研究现状及不足之处              | 43 |
| 3.1.3 研究方法和思路                | 44 |
| 3.2 PFS 低碳调度模型及其基本性质         | 45 |
| 3.2.1 数学模型                   | 45 |
| 3.2.2 基本性质                   | 46 |
| 3.2.3 双机问题的最优解法              | 47 |
| 3.2.4 主要结论                   | 48 |
| 3.3 基于启发式算法的 PFS 低碳调度模型      | 50 |
| 3.3.1 EENEH 启发式算法            | 50 |
| 3.3.2 算法性能验证                 | 50 |
| 3.3.3 双机情形下的多目标优化问题          | 52 |
| 3.3.4 应用实例                   | 53 |
| 3.3.5 结论                     | 54 |
| 3.4 基于分枝定界算法的 PFS 低碳调度模型     | 54 |
| 3.4.1 分枝定界算法的基本原理            | 54 |
| 3.4.2 基于分枝定界算法的 PFS 低碳调度模型框架 | 55 |
| 3.4.3 应用实例                   | 57 |
| 3.4.4 结论                     | 60 |
| 3.5 基于遗传算法的 PFS 低碳调度模型       | 61 |
| 3.5.1 随机遗传算法求解               | 61 |
| 3.5.2 一种改进的差分遗传算法求解          | 64 |
| 3.5.3 结论                     | 70 |
| 3.6 本章小结                     | 70 |
| <b>第 4 章 混合流水车间低碳调度模型</b>    | 71 |
| 4.1 引言                       | 71 |
| 4.1.1 问题描述                   | 71 |
| 4.1.2 研究现状及不足之处              | 72 |
| 4.1.3 研究方法和思路                | 75 |
| 4.2 模型定义                     | 75 |
| 4.3 基于遗传算法的 HFS 低碳调度模型       | 77 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 4.3.1 算法描述                 | 77         |
| 4.3.2 模型仿真                 | 79         |
| 4.4 基于免疫遗传算法的 HFS 低碳调度模型   | 84         |
| 4.4.1 算法描述                 | 85         |
| 4.4.2 模型验证                 | 88         |
| 4.4.3 基于混合流水车间的轮胎生产低碳调度优化  | 92         |
| 4.4.4 总结                   | 93         |
| 4.5 基于微粒群算法的 HFS 低碳调度模型    | 93         |
| 4.5.1 算法描述                 | 94         |
| 4.5.2 模型仿真                 | 96         |
| 4.6 本章小结                   | 99         |
| <b>第 5 章 分布式流水车间低碳调度模型</b> | <b>100</b> |
| 5.1 引言                     | 100        |
| 5.1.1 问题描述                 | 100        |
| 5.1.2 研究现状                 | 101        |
| 5.1.3 研究方法与思路              | 102        |
| 5.2 基本原理                   | 103        |
| 5.2.1 ATC 概述               | 103        |
| 5.2.2 多目标优化                | 108        |
| 5.3 模型构建                   | 111        |
| 5.3.1 模型分解                 | 111        |
| 5.3.2 关键链接                 | 112        |
| 5.3.3 各层 ATC 编码            | 114        |
| 5.3.4 ATC 低碳调度模型           | 115        |
| 5.4 实验与结果                  | 116        |
| 5.4.1 模型实现与参数设定            | 116        |
| 5.4.2 实验过程与结果分析            | 117        |
| 5.4.3 应用实例                 | 121        |
| 5.5 本章小结                   | 122        |
| <b>第 6 章 碳效优化流水车间调度模型</b>  | <b>124</b> |
| 6.1 引言                     | 124        |
| 6.1.1 问题描述                 | 124        |
| 6.1.2 研究现状                 | 126        |

---

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 6.1.3 研究方法思路 .....               | 127        |
| 6.2 模型描述 .....                   | 127        |
| 6.2.1 产品制造过程定义 .....             | 127        |
| 6.2.2 系统边界确定 .....               | 129        |
| 6.2.3 ATC 优化协调 .....             | 129        |
| 6.2.4 制造过程碳效分析 .....             | 131        |
| 6.3 应用实例 .....                   | 133        |
| 6.3.1 参数设置 .....                 | 133        |
| 6.3.2 实验结果 .....                 | 136        |
| 6.4 本章小结 .....                   | 138        |
| <b>第7章 制造过程低碳异常检测模型</b> .....    | <b>140</b> |
| 7.1 引言 .....                     | 140        |
| 7.2 低碳异常检测模型框架 .....             | 141        |
| 7.2.1 橡胶硫化过程的简要描述 .....          | 141        |
| 7.2.2 硫化能效的数据融合模型 .....          | 141        |
| 7.2.3 硫化能耗分析 .....               | 142        |
| 7.3 能耗回归预测方法 .....               | 145        |
| 7.3.1 线性回归模型 .....               | 145        |
| 7.3.2 神经网络和支持向量机回归方法 .....       | 146        |
| 7.4 能耗异常区间估计 .....               | 147        |
| 7.4.1 多元线性回归估计 .....             | 147        |
| 7.4.2 基于神经网络和支持向量机的区间估计 .....    | 148        |
| 7.5 实验结果分析 .....                 | 149        |
| 7.6 本章小结 .....                   | 152        |
| <b>第8章 制造过程低碳优化系统设计与应用</b> ..... | <b>153</b> |
| 8.1 引言 .....                     | 153        |
| 8.2 系统需求分析 .....                 | 153        |
| 8.2.1 制造企业能源管理现状 .....           | 153        |
| 8.2.2 低碳优化分析的数据需求 .....          | 154        |
| 8.2.3 低碳优化分析的功能需求 .....          | 156        |
| 8.2.4 低碳优化系统的关键技术需求 .....        | 158        |
| 8.3 系统总体设计 .....                 | 160        |
| 8.4 能源数据采集 .....                 | 162        |

---

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 8.4.1 能源计量仪表 .....      | 162 |
| 8.4.2 能耗数据传输网络 .....    | 164 |
| 8.4.3 能耗数据采集中间件设计 ..... | 164 |
| 8.5 能源数据融合与存储 .....     | 166 |
| 8.5.1 能耗量纲转换 .....      | 167 |
| 8.5.2 能耗时间统计 .....      | 167 |
| 8.5.3 能耗空间统计 .....      | 168 |
| 8.5.4 表计虚拟计算 .....      | 168 |
| 8.5.5 能耗指标定义 .....      | 168 |
| 8.5.6 能耗数据结构 .....      | 169 |
| 8.5.7 能耗数据存储模式 .....    | 171 |
| 8.6 低碳优化模型库实现 .....     | 173 |
| 8.6.1 模型库集成框架设计 .....   | 173 |
| 8.6.2 模型调用接口设计 .....    | 174 |
| 8.6.3 模型应用流程设计 .....    | 175 |
| 8.7 系统工具包实现 .....       | 176 |
| 8.7.1 企业能耗监管 .....      | 176 |
| 8.7.2 企业能效分析 .....      | 183 |
| 8.7.3 企业能耗异常诊断 .....    | 185 |
| 8.7.4 企业低碳调度优化 .....    | 188 |
| 8.7.5 企业能源管理决策 .....    | 191 |
| 8.8 应用案例 .....          | 198 |
| 8.8.1 轮胎应用案例 .....      | 198 |
| 8.8.2 高新区云模式应用案例 .....  | 205 |
| 8.9 本章小结 .....          | 208 |
| 参考文献 .....              | 209 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景

### 1. 全球能源消费逐年增加,环境污染日益严重

第二次世界大战之后,全球经济进入快速发展阶段,世界能源消费需求呈现快速增长趋势。据英国石油公司(BP)2012年6月10日发布的世界能源年度统计报告显示,世界能源消费除在2009年经济危机期间有所下降外,其余均每年保持2.5%左右的增长<sup>[1]</sup>。随着经济复苏,2010年全球能源消费比上年增长5.6%,是1973年以来增速最快的一年。各种能源需求量均增长强劲,无论是经合组织(OECD)国家还是非经合组织国家,能源消费增速均高于历史平均水平。OECD国家的能源需求增长了3.5%,为1984年以来增幅最大;非OECD国家能源消费量增长了7.5%,比2000年高出63%<sup>[2]</sup>。图1-1显示出自1986~2011年全球各类能源消费的增长情况。

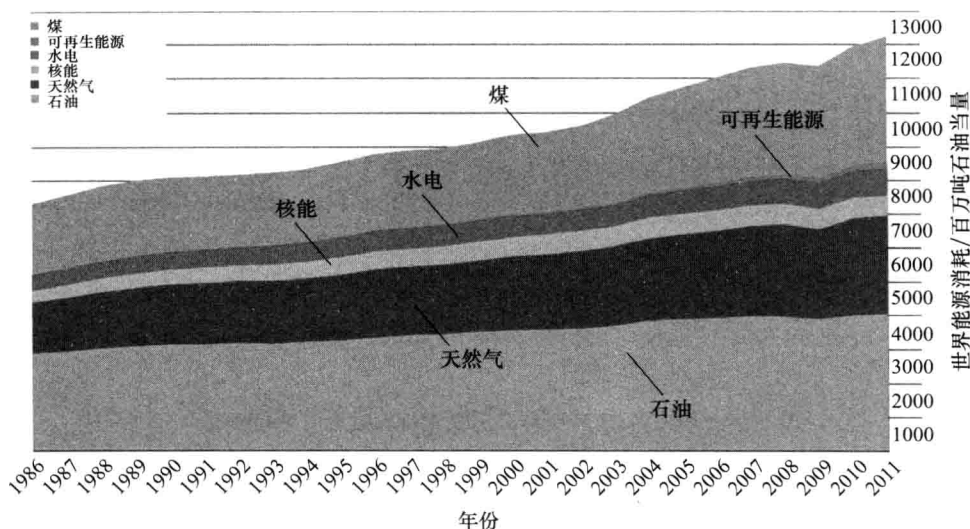


图 1-1 1986~2011 年世界能源消费增长情况

2011 年全球总能源消耗超过 12 亿吨石油当量,达到历史最高位。其中,石油、煤、天然气依然是三大主要能源燃料,核能和可再生能源所占比例未见明显提高。BP 公司的基准情景预测指出,2010~2030 年世界一次能源需求年均增长率将保持在 1.7% 的水平,一次能源使用增长将近 40%。BP 世界能源统计报告中指出,截至 2011 年年底,世界石油探明储量为 1.6526 万亿桶,仅满足未来 54.2 年的全球生产需求;世界已探明可采煤炭储量共计 15980 亿吨,预计还可开采 200 年;探明可采天然气储量共计 119 万亿立方米,预计还可开采 60 年<sup>[1]</sup>。

强劲的能源增长自然会促使碳排放相应的增长。2010 年,来自化石燃料消费的全球二氧化碳排放量增长了 5.8%,达到 33.16 亿吨,超过了能源消费的增长速度,达到了 1969 年以来的最高水平。其中,OECD 国家和非 OECD 国家的二氧化碳排放量均增长强劲,分别增长了 3.4% 和 7.6%。从区域来看,首先是我国的二氧化碳排放量增长最多,同比增长 10.4%,达到 83.32 亿吨,占全球增量的 43%;其次是美国,增长了 4.1%,占增量的 13%<sup>[3]</sup>。据美联社 2011 年 9 月 27 日报道,世界卫生组织(WHO)26 日发布首份全球城市空气污染调查报告,该报告显示,根据 WHO 室外空气污染数据,我国的 PM10 浓度为  $98\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,在 91 个国家中排名第 77 位,处于中下游水平,本次报告对我国 31 个城市的空气污染情况做了调查,PM10 数值全部超标<sup>[4]</sup>。图 1-2 显示了自 1990~2011 年各个国家和地区二氧化碳排放的增长变化情况。

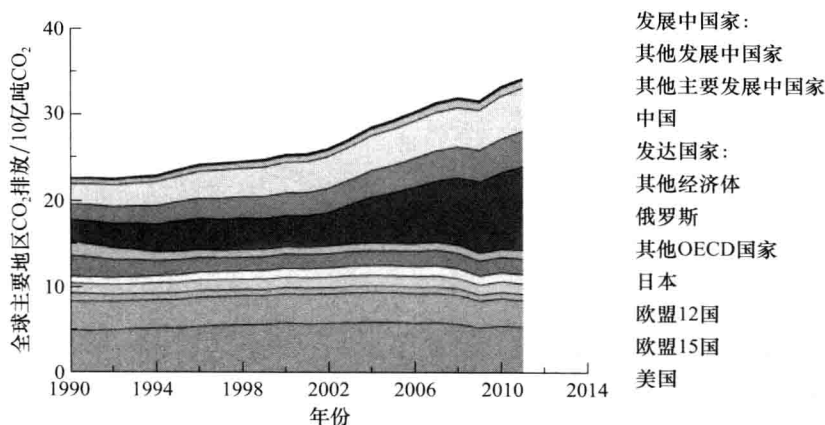


图 1-2 1990~2011 年全球二氧化碳排放量地区分布情况<sup>[3]</sup>

## 2. 我国成为世界第一大能源消费国

国际能源机构(IEA)在报告中将全球一次能源需求的强劲增长归因于我国、印度等发展中国家的强势崛起<sup>[5]</sup>。报告指出,我国以巨大的生产制造规模在国际

化石燃料贸易中占据越来越重要的地位,其正在改变全球的能源体系;我国经济以惊人速度增长,超过了其他大国的经济增长速度,这极大地推动了它的能源需求,而且其能源进口在能源需求中的比重也随之增长。表 1-1 和图 1-3<sup>[6]</sup> 给出了我国 1995~2010 年的能源消费总量及结构构成情况。

表 1-1 1995~2010 年我国能源消费总量及结构构成

| 年份   | 能源消耗总量/<br>万吨石油当量 | 占能源消费总量的比重/% |      |     |              |
|------|-------------------|--------------|------|-----|--------------|
|      |                   | 煤炭           | 石油   | 天然气 | 水电、核电、<br>风电 |
| 1995 | 133176            | 74.6         | 17.5 | 1.8 | 6.1          |
| 1996 | 133176            | 74.7         | 18.0 | 1.8 | 5.5          |
| 1997 | 133798            | 71.7         | 20.4 | 1.7 | 6.2          |
| 1998 | 132214            | 69.6         | 21.5 | 2.2 | 6.7          |
| 1999 | 133381            | 69.1         | 22.6 | 2.1 | 6.2          |
| 2000 | 138553            | 67.8         | 23.2 | 2.4 | 6.7          |
| 2001 | 143199            | 66.7         | 22.9 | 2.6 | 7.9          |
| 2002 | 151797            | 66.3         | 23.4 | 2.6 | 7.7          |
| 2003 | 174990            | 68.4         | 22.2 | 2.6 | 6.8          |
| 2004 | 203227            | 68.0         | 22.3 | 2.6 | 7.1          |
| 2005 | 224682            | 69.1         | 21.0 | 2.8 | 7.1          |
| 2006 | 246270            | 69.4         | 20.4 | 3.0 | 7.2          |
| 2007 | 265583            | 69.5         | 19.7 | 3.5 | 7.3          |
| 2008 | 306890            | 68.7         | 18.0 | 3.8 | 9.5          |
| 2009 | 306890            | 68.5         | 17.6 | 3.9 | 10           |
| 2010 | 325000            | 67.9         | 16.6 | 4.6 | 10.9         |

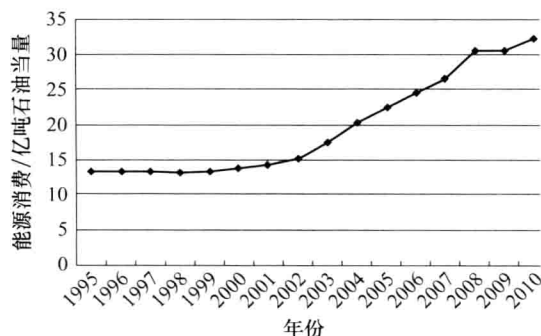


图 1-3 1995~2010 年我国能源消费总量变化趋势

据 IEA 统计,2009 年我国超过美国成为第一大能源消费国;BP 公司统计显示,2010 年我国超过美国成第一大能源消费国;而《2012 中国能源发展报告》显

示<sup>[7]</sup>,根据中美两国各自公布的统计数据,我国的能源消费总量一直没有超过美国,仍居第二。但毫无疑问的是,未来我国将成为世界第一大能源消费国。2011年我国能源消费总量 34.78 亿吨标准煤,比前一年增长 7%;2011 年,我国 GDP 约占世界的 8.6%,但能源消耗占世界的 19.3%,其原因是中国是全世界的制造基地。

### 3. 制造业是我国支柱产业,每年消费近六成能源

我国在全球扮演着世界工厂的角色,每年向发达国家输出大量工业成品,表 1-2 给出了 2010 年世界国家/地区制造业的排名情况<sup>[8]</sup>。2010 年我国制造业增加值占 GDP 比重的 41%,远高于美、日、德、意、法等发达国家和印度、墨西哥等发展中国家,我国承担着全球 21.5%的制造任务<sup>[8]</sup>。图 1-4 显示了世界主要国家制造业分布情况。我国制造业每年消耗 180595.96 万吨当量标准煤,占国内全年能源消耗总量的 59%,如图 1-5 所示<sup>[6]</sup>。以制造业为支撑的我国经济经历了改革开放 30 年的快速增长时期,取得了举世瞩目的成就。但随着经济规模的进一步扩大,能源需求总量也在不断增加,能源短缺、环境压力与经济增长的矛盾日趋尖锐,同时,粗放型的能源生产和使用方式、能源结构不合理和浪费严重等问题更加凸显了我国能源短缺、供求失衡的现状。制造业是我国的支柱产业,地位举足轻重,而制造业发展过程中高能耗、高污染现象日益严重。

表 1-2 2010 年世界国家/地区制造业排名(联合国统计司数据)

| 排名 | 国家/地区 | 制造业/亿美元  | GDP 比重/% |
|----|-------|----------|----------|
| 1  | 中国    | 20498.99 | 41.13    |
| 2  | 美国    | 17794.74 | 12.60    |
| 3  | 日本    | 10505.98 | 20.73    |
| 4  | 德国    | 5679.01  | 17.05    |
| 5  | 意大利   | 3096.28  | 14.66    |
| 6  | 法国    | 2536.08  | 9.57     |
| 7  | 英国    | 2175.94  | 10.03    |
| 8  | 巴西    | 2094.54  | 13.32    |
| 9  | 韩国    | 2081.42  | 25.00    |
| 10 | 印度    | 1923.55  | 14.94    |
| 11 | 西班牙   | 1724.33  | 11.78    |
| 12 | 墨西哥   | 1624.77  | 18.63    |
| 13 | 俄罗斯   | 1619.58  | 13.16    |
| 14 | 印度尼西亚 | 1425.33  | 26.38    |
| 15 | 加拿大   | 1403.23  | 10.50    |

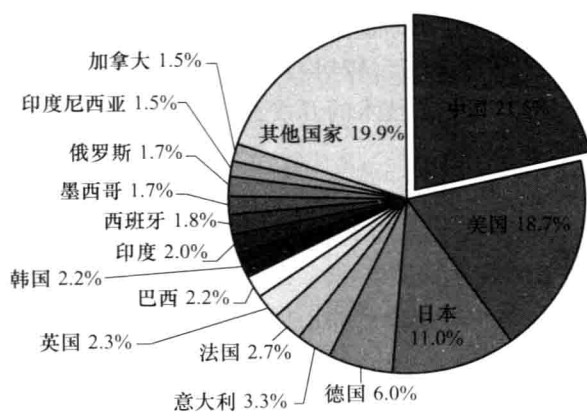


图 1-4 2010 年世界主要国家制造业分布

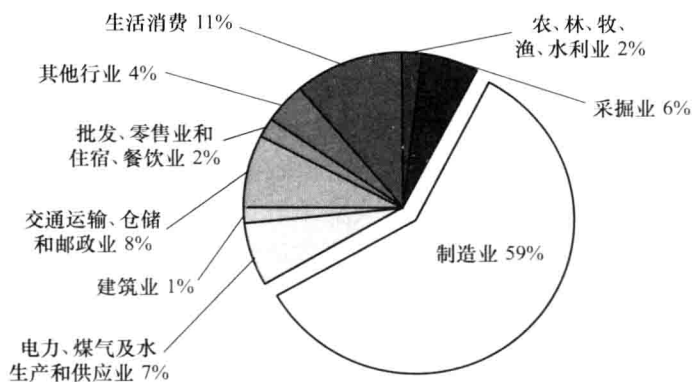


图 1-5 2009 年我国能源消耗量行业分布

#### 4. 发展节能低碳技术是我国制造业的必然选择

“如不尽快采取有效措施,切实转变依靠透支资源、环境的粗放发展方式,预计到 2020 年和 2030 年我国能源消费总量可能超过 55 亿吨和 75 亿吨标准煤。这将过快地消耗掉我国未来的资源,过早地耗尽大部分发展潜力,严重影响我国经济社会可持续发展。”国家能源局副局长吴吟在一次演讲中如是说。

中国工程院的预测更让人担忧,“如果我国能源消费保持前几年 8.9% 的增速,2020 年能源消耗将达到 79 亿吨标准煤,占目前世界能源消耗总量一半。即使能持续实现每五年单位 GDP 能耗下降 20%,以 GDP 继续保持 9% 以上年经济增长速度,2020 年我国能耗将占目前世界能耗三成。”

另外,随着石油、天然气、煤炭进口量的不断增长,我国的能源对外依存度进一

步上升,获取能源的成本也在不断提高。这表明,我国经济的可持续发展需要比以前付出更多的努力。因此,调整经济结构,转变生产方式,提高能源使用效率,加快能源市场改革,同时鼓励新能源技术的开发和应用,降低二氧化碳排放等,都是摆在我国面前急需解决的问题。

《特大城市承载力研究》指出,我国单位 GDP 的能耗是日本的 7 倍,美国的 6 倍,甚至是印度的 2.8 倍,世界平均水平的 2.2 倍<sup>[9]</sup>。无论是从工艺装备水平还是能源使用管理技术方面,都与发达国家存在一定差距。因此,推进低碳制造模式,推动低碳制造技术发展,实施能源精细化管理、提高能源效率,实现碳排放的有效控制,是解决我国制造业能耗较高的迫切问题之一。

#### 5. 制造业实现节能低碳目标的主要手段

学术界通常将工业节能技术分为结构节能、技术节能、管理节能三个层次。

结构节能是指通过调整产业结构、产品结构、企业结构和改善车间布局和生产规模以间接实现制造业企业节能目标。调整产业结构主要是通过国家层面调整高耗能产业比例等方式来调整各行业对能源的消耗,尽量发展低耗能型工业,以降低整个制造行业的能耗使用量。当产业结构向着节能型方向发展时,产品结构也就朝着高级、精密方向发展,从而提高产品附加值,降低产品能耗。此外,企业生产组织结构、工艺技术结构和用能模式对能耗影响较大,特别是高能耗小型企业,应当将其组织起来,通过联合管理的方式实现高效用能。

在技术节能方面,重庆大学的曹华军<sup>[10]</sup>给出了低碳制造的技术体系框架,如图 1-6 所示。技术节能实现途径主要从设备、工艺、回收利用和工人操作等方面入手。能源的转化和使用都是在设备中进行的,设备的质量和性能在很大程度上决定了能源的有效利用水平。引进先进高效节能设备、淘汰和改进落后设备、合理使用高能耗设备是实现节能的主要手段。工艺节能主要是通过采用先进工艺、优化工艺参数、改变工艺流程等方法达到节能效果。能源是在工艺流程和设备运行过程中被消耗的,因此,采用合理的工艺流程和工艺参数是制造过程中节能的基础。另外,能源在转换、传输过程中,总会产生一定的能量损失,因而对这部分损失的能量加以回收利用也是实现节能的重要途径之一。回收的能源主要分为可燃性余能如废弃、尾气等,载热性余能也就是余热,有压性余能及余压。此外,改善工人的操作水平也能促进节能。自 2006 年以来,国家发展和改革委员会已经连续颁布了四批《国家重点节能技术推广目录》<sup>[11]</sup>,制造企业主要从新工艺、新技术和新设备方面积极开展节能技术研发和引进工作,取得了显著效果。

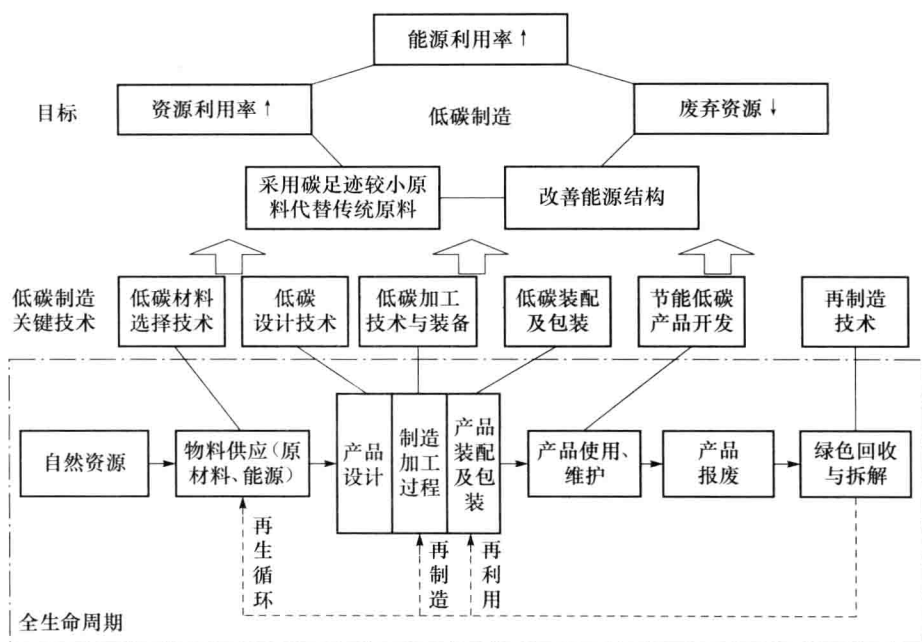


图 1-6 低碳制造的技术体系框架

管理节能主要是通过合理组织生产、运输和分配等措施达到节能降耗。随着低碳制造理论和技术研究的深入,从能源管理角度实现节能的理论和方法也日益得到人们的重视。管理节能是指针对高耗能行业,如钢铁、轮胎、水泥等,开展以节能为目标的低碳制造优化模型、产品加工过程能耗理论与技术、制造过程能源综合利用和管理的系统研究,加强生产加工车间、企业、产业集群的能源协调管理,构建能源管理系统,将制造工艺与能耗分析相结合,建立低碳生产调度模型和低碳异常检测模型等低碳优化模型,将设备或工艺的节能与实际生产决策和执行过程中的能耗联系起来,进行集中管理和监控。管理节能是除结构节能、技术节能之外的另一个重要的节能手段。

结构节能、技术节能和管理节能是提高能源利用效率的三种主要途径。从这三种途径的实现路线来看,结构节能主要从宏观层面对产业结构进行调整,使能源从高能耗低附加值产业流向低能耗高附加值产业,然而产业结构调整在很大程度上依赖于其他类型经济结构的调整,诸如能源消费结构、城乡结构、收入结构甚至税收结构等,政府是结构节能路线的设计者和指挥者。技术节能主要通过生产工艺、生产设备以及制造技术等方面的革新来提高能源使用效率,还需要企业对生产方式进行大量资金投入,且新设备、新技术的研发往往需要整个产业链协调进行。管理节能采用管理创新、信息融合、智能优化等软性技术来达到降低制造过程能量