

基于活动的产品车间制造过程碳排放量计算方法^{*}

唐任仲^{*}, 贾 顺, 吕景祥

(浙江大学 机械工程学系工业工程研究室, 浙江省先进制造技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:借鉴基于活动的成本法思想,提出了一种基于活动的碳排放量计算方法。首先介绍了活动碳算法的概念和原理,建立了基于活动的产品车间制造过程碳排放量计算模型;分析并给出了计算模型中关键要素的获取和计算方法;最后给出应用实例,验证了所提方法的有效性。研究结果可进一步应用于制造过程的低碳评价和优化。

关键词:活动碳算法;制造过程;资源;碳排放量;计算模型

中图分类号:TH14;TH16;TH18

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)06-0639-06

Activity-Based Carbon-computing method for manufacturing process

TANG Ren-zhong, JIA Shun, LV Jing-Xiang

(Institute of Industrial Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zhejiang Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: An activity-based carbon-computing method was proposed by using the thinking of activity-based costing for reference. Firstly, the conception and principle of the activity-based carbon-computing method were presented; then the carbon-computing model of the product manufacturing process was established based on activity; the acquisition and calculation approach of the key elements of the computing model were analyzed and presented; Finally, a case study was presented, which demonstrates the validity of the proposed method. The research result can be furtherly applied to the low carbon evaluation and optimization.

Key words: activity-based carbon-computing; manufacturing process; resources; carbon emission; computing model

0 引 言

当前,全球气候变暖趋势日益明显,环境污染问题日益突出,全球各国都在积极采取措施,应对气候变化和环境污染问题。制造业在将资源转变为产品(服务)的过程中消耗大量的资源,对环境造成了严重污染并排放大量的 CO₂。据国际能源署研究显示:制造业的 CO₂ 排放量占全球总排放量的 36%,另外,制造业的能源消耗也将近占全球能源消耗的三分之一。美国麻省理工学院 GUTOWSKI 教授的研究报告中指出:一台主轴功率 22 kW 的数控机床,运行一年消耗电能所带来的 CO₂ 和 SO₂ 的排放量分别相当于 61 辆和 248 辆 SUV 汽车的排放量(假设条件:①机床为两班工作制,加工时间占 57%;②SUV 每年行驶 12 000 英

里,耗油量 20.7 mpg)。足见,制造业已成为碳排放的主要来源之一。

我国是制造业大国,制造业在为我国带来巨大发展的同时,也消耗了大量的资源,产生了碳排放。全球碳计划组织(GCP)的研究结果显示:中国在 2006 年已超越美国成为全球最大的 CO₂ 排放国,仅 2007 年,中国碳排放量就高达 18 亿吨。为了应对此问题,我国政府承诺:到 2020 年,单位 GDP 碳排放量比 2005 年减少 40~45%。另外,路甬祥院士^[1]指出中国制造业面临着能耗增长快、节能效率低等问题和挑战,走向绿色和智能制造,是中国制造业发展的必由之路。因此研究产品车间制造过程的碳排放量,进一步用于低碳评价和优化,对减少制造业的碳排放具有十分重要的现实意义,有利于节能减排的顺利推进。

目前,国内外很多学者在制造过程能量消耗和碳

收稿日期:2011-03-30

基金项目:The University of Nottingham-Zhejiang Collaborative Fund

作者简介:唐任仲(1961-),男,教授,博士生导师,湖南湘潭人,主要从事低碳制造、制造业信息化、精益过程管理等方面的研究. E-mail: tangrz@zju.edu.cn

排量分析计算方面开展了研究,取得了一些有益成果。如:JESWIET J 等^[2]总结分析了 4 种不同燃料发电所带来的碳排放,给出了一种简单的产品生产过程中由于电能消耗而引起的碳排放量的计算方法;RAHIMI-FARD S 等^[3]提出了一种产品生产过程中能量消耗的分析方法,利于发现产品生产过程中能量利用效率低的环节,进而降低能量消耗;尹勇^[4]等从微观和宏观两个角度,对面向绿色制造的产品制造在制造过程中能源消耗进行分析建模,并介绍了一种基于能值理论的能耗模型;戚赟徽^[5]等建立了产品系统资/能源流框图,给出产品全生命周期能量模型,并分析了产品结构 with 产品生命周期各阶段能耗间的关系;CHOI A C K 等^[6]以“物料平衡”为基础,研究了用于环境影响评价的制造过程模型。

另外,近几年国内外涌现出了一批低碳制造相关的组织。如:英国诺丁汉大学、剑桥大学以及我国再制造技术国家重点实验室、清华大学、宁波诺丁汉大学、浙江大学等联合成立了中英低碳制造联盟,在低碳制造领域开展了学术研究和讨论活动^[7-8];世界自然基金会 2008 年提出了低碳制造计划(Low Carbon Manufacturing Program, LCMP),旨在肯定制造商就降低其全球供应链的温室气体排放做出的正面行动,并为之提供工具,探求降低碳排放的方法,推动工业减排;国际生产工程学会(CIRP)于 2008 年 1 月成立了低碳制造工作组(Low Carbon Manufacturing Working Group, CWG),主要将设计与制造(包括先进制造)工艺过程中节能减排进行综合协调研究。

上述研究在低碳制造领域取得了一些成果。在总结分析上述研究成果的基础上,在我国产品车间制造过程碳排放基础数据较为缺乏的背景下,借鉴基于活动的成本法思想,本研究提出了一种基于活动的产品车间制造过程碳排放量计算方法或称为活动碳算法(Activity-Based Carbon-computing),进而为实现制造过程碳排放量的评价和优化提供支持。

1 活动碳算法概念和原理

基于活动的成本法(Activity-Based Costing, ABC):是一种先进的成本计算方法,它是基于产品(服务)对活动所消耗的资源,并按其分配率将其分摊至产品(服务)成本的计算方法,即产品(服务)消耗活动,活动消耗资源^[9-10]。借鉴上述定义,可将活动碳算法定义为:一种基于产品(服务)对活动所消耗的资源碳排放,并按其分配率将其分摊至产品(服务)碳排放的计算方法。

产品车间制造过程碳排放研究的关键和难点就是

获取每一项最基本的过程或活动的碳排放量,活动碳算法的原理是:首先将车间制造过程划分为活动,再将研究范围内的资源碳排放按资源动因归集到各活动中,最终将各活动碳排放按其活动动因归集(映射)到各产品中。活动碳算法原理图如图 1 所示。

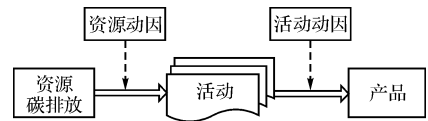


图 1 活动碳算法原理图

资源动因反映了活动对资源碳排放消耗的逻辑关系,如:活动执行时间、工时数等;活动动因反映了产品对活动消耗的逻辑关系,如:活动执行次数。

2 产品车间制造过程碳排放量计算模型

本研究提出的基于活动的产品车间制造过程碳排放量计算方法首先将产品车间制造过程划分为一系列的基本活动,获取各活动消耗的与碳排放相关资源的总量,然后根据产品车间制造过程包括的活动类别及活动数,计算产品车间制造过程碳排放量。

产品车间制造过程中的资源消耗分为直接资源消耗和间接资源消耗。所谓产品车间制造过程的直接资源消耗是指产品在每一道制造工序由于制造加工产品所消耗的资源,主要体现为机床加工工件时的资源消耗;该部分资源可以直接计入产品的资源消耗。所谓间接资源消耗是指不能直接计入产品的资源消耗,需按其地点或用途进行归集,首先将间接资源消耗归集到各活动中,再按照产品对活动消耗的多少进一步将间接资源归集到产品中。产品直接资源消耗所导致的碳排放称为产品直接碳排放,产品间接资源消耗所导致的碳排放称为产品间接碳排放。产品车间制造过程的碳排放量等于直接碳排放与间接碳排放之和。本研究建立的产品车间制造过程碳排放资源映射关系如图 2 所示。

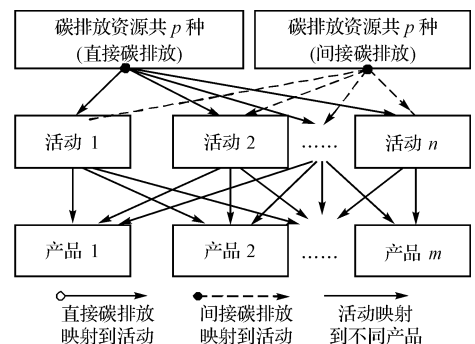


图 2 产品车间制造过程碳排放资源映射关系图
产品车间制造过程碳排放量的计算主要包括两大部

分:①产品车间制造过程直接碳排放量计算;②产品车间制造过程间接碳排放量计算。

2.1 产品车间制造过程直接碳排放量计算

首先确定研究制造系统的范围和边界,分析确定研究范围内的产品种类,设共 m 种;确定制造系统消耗的碳排放相关资源(电能、物料等),设共 p 种;识别、选择并确定制造系统内的主要活动,设共 n 个。

(1) 确定产品在每个活动中的单位产品直接资源消耗量 DR_{ijk} 。

(2) 单位产品直接资源消耗量计算公式:

$$DR_{ik} = \sum_{j=1}^n DR_{ijk} \tag{1}$$

式中: DR_{ik} —产品 i 对第 k 种资源的单位产品直接资源消耗量, DR_{ijk} —产品 i 在活动 j 中对第 k 种资源的单位产品直接资源消耗量。

(3) 单位产品直接碳排放量计算公式:

$$DCE_i = \sum_{k=1}^p DR_{ik} \times E_k \tag{2}$$

式中: DCE_i —产品 i 的单位产品直接碳排放量, E_k —第 k 种资源的碳排放系数, p —资源种类数。

2.2 产品车间制造过程间接碳排放量计算

将间接资源消耗归集到各活动中,再根据产品对各活动消耗的多少进一步将间接资源归集到产品中。

(1) 首先结合产品制造工艺文件对产品车间制造过程进行分析,确定产品执行各活动的次数,即确定各产品的活动动因量 Q_{ij} ;并确定活动消耗的间接资源总量 $TIPR_{jk}$ 。

(2) 单位活动动因资源的计算公式:

$$IPR_{jk} = TIPR_{jk} / Q_j \tag{3}$$

式中: IPR_{jk} —活动 j 间接消耗第 k 种资源的单位活动动因资源, $TIPR_{jk}$ —活动 j 间接消耗第 k 种资源的总量, Q_j —活动 j 的活动动因总量, n —活动总数量。

(3) 单位产品间接资源消耗量计算公式:

$$IR_{ik} = \left(\sum_{j=1}^n IPR_{jk} \times Q_{ij} \right) / P_i \tag{4}$$

且有

$$Q_j = \sum_{i=1}^m Q_{ij} (i = 1, 2, \cdots, m) \tag{5}$$

式中: IR_{ik} —产品 i 对第 k 种资源的单位产品间接资源消耗量, IPR_{jk} —活动 j 消耗第 k 种资源的单位活动动因资源, Q_{ij} —产品 i 消耗活动 j 的活动动因量, P_i —产品 i 的产量。

(4) 单位产品间接碳排放量计算公式:

$$ICE_i = \sum_{k=1}^p IR_{ik} \times E_k \tag{6}$$

式中: ICE_i —产品 i 的单位产品间接碳排放量。

最后,将产品车间制造过程直接碳排放量与间接碳排放量进行汇总,可以得到产品车间制造过程的碳排放量计算公式:

$$CE_i = DCE_i + ICE_i \tag{7}$$

式中: CE_i —产品 i 的单位产品碳排放量。

将式(1~6)代入式(7),则产品车间制造过程的碳排放量的计算公式可表达为:

$$CE_i = DCE_i + ICE_i = \sum_{k=1}^p \left\{ \sum_{j=1}^n DR_{ijk} + \left[\sum_{j=1}^n \left(TIPR_{jk} / \sum_{i=1}^m Q_{ij} \right) \times Q_{ij} \right] / P_i \right\} \times E_k \tag{8}$$

基于活动的产品车间制造过程碳排放量计算方法的流程如图 3 所示。

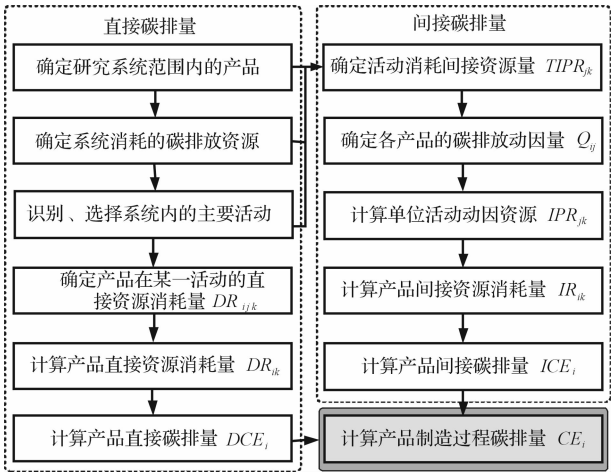


图 3 产品车间制造过程碳排放量计算方法流程图

3 碳排放量计算模型关键要素研究

从产品车间制造过程碳排放量计算公式(式(8))可知,要计算产品车间制造过程的碳排放量必须要获取以下 5 项基础数据:①产品 i 在活动 j 中对第 k 种资源的单位产品直接资源消耗量 DR_{ijk} ;②活动 j 间接消耗第 k 种资源的总量 $TIPR_{jk}$;③产品 i 对活动 j 的活动动因量 Q_{ij} ;④产品 i 的产量 P_i ;⑤第 k 种资源的碳排放系数 E_k 。其中, Q_{ij} 、 P_i 的值可以根据工艺文件和生产计划等容易得到; E_k 值可以根据文献[11-12]中的数据,整理计算得出电能(如表 1 所示)和常用物料(如表 2 所示)的碳排放系数。因此这 3 项数据值的获取不作为本研究的重点。而 DR_{ijk} 和 $TIPR_{jk}$ 的数据值的获取是重点和难点,也是本研究的关键;下文将详细论述 DR_{ijk} 与 $TIPR_{jk}$ 的获取和计算方法。

表 1 电能碳排放系数(E_{ke})表

电网名称	$E_{ke}/(\text{kgCO}_2/\text{kWh})$	电网名称	$E_{ke}/(\text{kgCO}_2/\text{kWh})$
华北电网	0.780 2	华中电网	0.580 2
东北电网	0.724 2	西北电网	0.643 3
华东电网	0.682 6	南方电网	0.577 2
全国平均	0.674 7		

注:根据国家电力信息网公布的主要电网发电比例,统计计算全国平均电能碳排放系数。

表 2 物料碳排放系数(E_{km})表

常用物料	$E/(\text{MJ}/\text{kg})$	$E_{km}/(\text{kgCO}_2/\text{kg})$
钢	31	5.809 9
铝	219	41.044 3

注:结合表 1 中全国平均电能碳排放系数换算。

3.1 单位产品直接资源消耗量(DR_{ijk})研究

产品在某一活动中的单位产品直接资源消耗量 DR_{ijk} 的获取方法有两种:①实测法;②理论计算法。

(1) 实测法。

实测法是指通过在执行每个活动的生产设备中安装不同类型的数据采集设备,实时采集各活动的直接资源消耗数据,并统计汇总得到单位产品直接资源消耗量的方法。产品直接资源消耗数据采集的设备配置如图 4 所示。

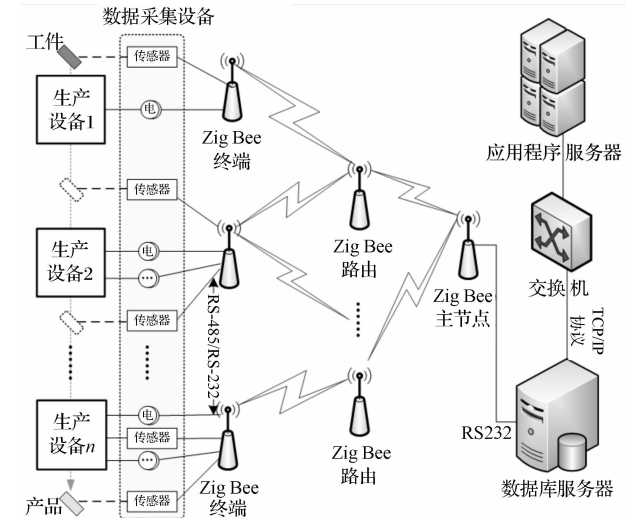


图 4 产品直接资源消耗数据采集的设备配置图

实测法可以较为方便地获取单位产品直接资源消耗量,但是它是一种事后测量统计的方法,并不能事前计算评估产品的直接资源消耗量。

(2) 理论计算法。

理论计算法是指通过确定单位产品直接资源消耗量与各加工要素间的定量关系,建立数学模型理论计算单位产品直接资源消耗量。理论计算法可以实现事前评估产品直接资源消耗量的目的。以典型的基本加工过程(铣削、磨削、车削等)的直接资源消耗量为研

究对象,分析不同加工要素条件对直接资源消耗量的影响,并通过理论分析和实验方法建立加工要素与直接资源消耗量间的理论计算模型;其中,又以直接能量消耗与加工要素间的理论计算模型最难建立。对于端面铣削加工的能量消耗理论计算模型可表达为^[13]:

$$R_e = \frac{P_c}{60\eta Z} \times V_c \tag{9}$$

式中: R_e —端面铣削能量消耗, kWh; P_c —主轴切削功率, kW; η —机床效率; Z —材料切削速率, cm^3/min ; V_c —材料切削量, cm^3 。

公式中的 P_c 和 Z 又与切削要素相关,可表示为切削要素的函数,因此式(9)可进一步表达为:

$$R_e = \frac{\pi D F_t}{3.672 \times 10^6 s_z t B z \eta} \times V_c \tag{10}$$

式中: D —铣刀直径, mm; F_t —切向切削力, N; s_z —每齿进给量, mm/tooth; t —切削深度, mm; B —轮齿接触长度, mm; z —铣刀齿数, teeth。

F_t 又与各切削要素相关, $F_t = f(v, s_z, t, B, A, z)$ 。采用二阶近似多项式表示为:

$$F_t = \exp \left[b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{i=1}^6 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^6 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^5 \sum_{k=j+1}^6 b_{ijk} x_j x_k \right] \tag{11}$$

且 $x_1 = \ln v, x_2 = \ln s_z, x_3 = \ln t, x_4 = \ln B, x_5 = \ln A, x_6 = \ln z$ 。

采用响应曲面法结合实验可确定 F_t ; 文献[13]中给出了 η 的确定方法。另外文献[14]也给出了铣削加工能量消耗与切削角度等的定量计算模型,可供参考。磨削过程能耗计算可借鉴文献[15]给出的磨削单位切削量能耗计算模型。车削加工能量消耗计算可借鉴文献[16]中给出的切削功率的计算公式,并结合车削加工时间和机床效率,进一步计算获得。

3.2 活动的间接资源消耗量($TIPR_{jk}$)研究

产品制造过程的间接资源消耗与车间基础设施和各活动的辅助设备相关,并不能直接计入产品的资源消耗。车间基础设施是为整个车间服务的设设施,如照明、通风设施等;其消耗的资源要归集到各个活动中;各活动的辅助设备是与各活动相关的对主要加工操作起辅助作用的设备,其资源消耗直接归入到该活动中。

对制造系统进行分析:确定车间基础设施的种类总数,设共 b 种;确定活动相关的辅助设备种类数量,设活动 j 相关的辅助设备共 a_j 种。产品车间制造过程间接资源碳排放构成如图 5 所示。

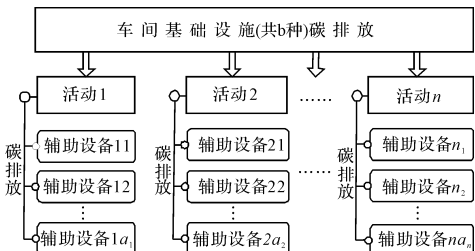


图5 产品车间制造过程间接资源碳排放构成图

活动消耗间接资源总量 $TIPR_{jk}$ 的计算方法如下：

(1) 首先借鉴 3.1 中所述的实测法对车间基础设施进行研究,确定车间基础设施单位时间资源消耗量 BP_{vk} 。

(2) 借鉴 3.1 中所述的实测法对各活动相关的辅助设备进行研究,确定各辅助设备单位时间资源消耗量 AP_{jkw} 。

(3) 活动对间接资源的单位时间理论消耗量计算公式:

$$TP_{jk} = \sum_{w=1}^{a_j} AP_{jkw} \times AQ_{jw} + \frac{1}{n} \sum_{v=1}^b BP_{vk} \times BQ_v \quad (12)$$

式中: TP_{jk} —活动 j 对第 k 种间接资源的单位时间理论消耗量, AP_{jkw} —活动 j 的辅助设备 w 对第 k 种资源的单位时间消耗量, AQ_{jw} —活动 j 的辅助设备 w 的数量, BP_{vk} —第 v 种车间基础设施对第 k 种资源的单位时间消耗量, BQ_v —第 v 种车间基础设施的数量。

(4) 活动的间接资源分配率计算公式:

$$\xi_{jk} = \frac{TP_{jk} \times t_j \times Q_j}{\sum_{j=1}^n (TP_{jk} \times t_j \times Q_j)} \quad (13)$$

式中: ξ_{jk} —活动 j 对第 k 种间接资源的分配率, t_j —活动 j 的活动时间, Q_j —活动 j 的活动动因总量。

(5) 活动的间接资源消耗量计算公式:

$$TIPR_{jk} = TIPR_k \times \xi_{jk} \quad (14)$$

式中: $TIPR_{jk}$ —活动 j 消耗第 k 种间接资源的总量, $TIPR_k$ —车间消耗第 k 种间接资源的总量。

车间消耗第 k 种间接资源的总量可由测量统计数据方便获取。

活动对间接资源消耗量计算方法的流程图如图 6 所示。

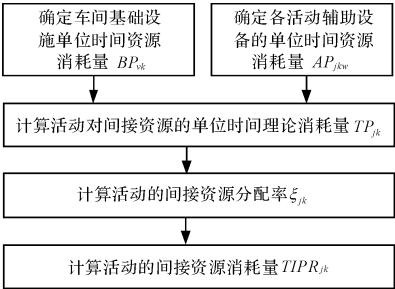


图6 活动的间接资源消耗量计算方法流程图

基于前述研究,将计算得到的单位产品直接资源消耗量 DR_{ijk} 和活动的间接资源消耗量 $TIPR_{jk}$,并结合获取的 Q_{ij} 、 P_i 和 E_k 的数据值,代入到公式(8)中,则可计算产品车间制造过程的碳排放量。

4 应用实例

对某汽车零部件制造企业的某制造车间进行分析后,确定 7 个主要的活动:①原材料检验、②车削加工、③铣削加工、④钻削加工、⑤工序检验、⑥成品装配、⑦总装检验;生产甲、乙、丙 3 种产品。在某月份该车间生产甲产品 565 台、乙产品 650 台、丙产品 580 台。通过实际测量统计分析得到 3 种产品消耗的直接资源量如表 3 所示。

表 3 单位产品直接资源消耗量

资源	单位	甲	乙	丙
电能	kWh	4.8	5.6	4.3
20#钢	kg	0	0.16	0
铝	kg	0.03	0	0.02

注:钢、铝的消耗指产品制造加工过程中去除的材料量。

单位产品甲直接碳排放量(结合表 1 和表 2 的碳排放系数):

$$DCE_1 = \sum_{k=1}^3 DR_{1k} \times E_k = 4.8 \times 0.6747 + 0 \times 5.8099 + 0.03 \times 41.0443 = 4.47(\text{kgCO}_2)$$

同理可求得单位产品乙、丙的直接碳排放量 $DCE_2 = 4.71(\text{kgCO}_2)$ 、 $DCE_3 = 3.72(\text{kgCO}_2)$ 。

该车间基础设施:照明设施 200 W 的节能灯共 20 盏;750 W 的通风设施共 6 台;且各活动相关的辅助设备的功率与数量如表 4 所示。

表 4 各活动的辅助设备表

活动	1	2	3	4	5	6	7
辅助设备	100	450	300	300	280	360	150
功率(W)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
		500	580	500			
		(1)	(1)	(1)			

注:括号中的数字为辅助设备的台数。

活动 1~7 的活动时间 t_j (min) 分别为:3,9,12,5,4,8,4。根据式(13),结合表 5 中的动因总量 Q_j ,可分别计算各活动的间接资源分配率。计算得出活动 1~7 的间接资源分配率分别为:4.1%,25.4%,16.3%,15.8%,21.1%,12.1%,5.2%。通过对车间实际生产的能耗测量,测得该车间在该月内的间接电能消耗为 4 205 kWh。根据式(14)则可计算出活动 1~7 的间接电能消耗(kWh) 分别为:172,1 068,686,664,887,509,219。

由于甲、乙、丙 3 种产品的结构与复杂程度不同,

所以其制造过程消耗的各活动动因量也不同,其活动动因量及单位活动动因资源如表 5 所示;单位活动动因资源 IPR_{jk} 根据式(4)、式(5)计算。

表 5 各活动动因量及单位活动动因资源表						
活动	间接电能/ kWh	动因量 Q_{ij} /次			动因总量 Q_j	IPR / (kWh/次)
		甲	乙	丙		
1	172	565	650	580	1 795	0. 096
2	1 068	565	1 300	580	2 445	0. 437
3	686	565	650	0	1 215	0. 565
4	664	1 130	650	1 160	2 940	0. 226
5	887	2 260	2 600	1 740	6 600	0. 134
6	509	565	650	580	1 795	0. 284
7	219	565	650	580	1 795	0. 122

设产品甲、乙、丙对应的 i 分别为 1、2、3;6 个主要活动所对应的 j 分别为 1~7;电能资源消耗对应的 k 为 1;则产品甲的单位产品间接电能消耗量:

$$IR_{11} = \left(\sum_{j=1}^7 IPR_{j1} \times Q_{1j} \right) / P_1 = (0. 096 \times 565 + 0. 437 \times 565 + 0. 565 \times 565 + 0. 226 \times 1\ 130 + 0. 134 \times 2\ 260 + 0. 284 \times 565 + 0. 122 \times 565) / 565 = 2. 492 \text{ (kWh)}$$

同理,可分别计算出产品乙、丙的单位产品间接电能消耗量 $IR_{21} = 2. 703 \text{ (kWh)}$ 、 $IR_{31} = 1. 793 \text{ (kWh)}$ 。

本例中,间接资源消耗主要为电能消耗,产品对物料的消耗归为直接资源消耗。因此,产品甲的间接碳排放量: $ICE_1 = \sum_{k=1}^3 IR_{1k} \times E_k = 2. 492 \times 0. 674\ 7 + 0 + 0 = 1. 68 \text{ (kgCO}_2\text{)}$;同理,可计算得乙、丙的间接碳排放量 $ICE_2 = 1. 82 \text{ (kgCO}_2\text{)}$ 、 $ICE_3 = 1. 21 \text{ (kgCO}_2\text{)}$ 。

进一步计算产品甲的制造过程碳排放量: $CE_1 = DCE_1 + ICE_1 = 4. 47 + 1. 68 = 6. 15 \text{ (kgCO}_2\text{)}$ 。同理,计算得到产品乙、丙的制造过程碳排放量分别为 $CE_2 = 6. 53 \text{ (kgCO}_2\text{)}$ 、 $CE_3 = 4. 93 \text{ (kgCO}_2\text{)}$ 。

5 结束语

本研究在我国车间制造过程碳排放基础数据较为缺乏的背景下,以产品车间制造过程的碳排放量为研究对象,借鉴基于活动的成本法思想,提出了一种基于活动的碳排放量计算方法;该方法以制造过程中的活动为研究基本单元,综合考虑产品车间制造过程的直接碳排放量和间接碳排放量,计算产品车间制造过程的碳排放量;并应用实例验证了所提方法的有效性。研究结果可应用于车间制造过程的碳排放量分析计算和评价,进一步可用于以碳排放量最小为目标的产品加工工艺过程优化;为企业实现经济效益社会效益和环境效益的综合

协调优化做出贡献。

参考文献(References):

[1] 路甬祥. 走向绿色和智能制造—中国制造发展之路[J]. 中国机械工程,2010,21(4):379-386.

[2] JESWIET J, KARA S. Carbon emissions and CESTM in manufacturing[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**,2008,57(1):17-20.

[3] RAHIMIFARD S, SEOW Y, CHILDS T. Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**,2010,59(1):25-28.

[4] 尹 勇,周祖德,龙毅宏. 绿色制造系统物资能耗模型及分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2009(9):102-105.

[5] 戚赛徽,王淑旺,刘光复,等. 面向能量优化的产品结构要素组合设计[J]. 机械工程学报,2008,44(1):161-167.

[6] CHOI A C K, KAEBERNICK H, LAI W H. Manufacturing processes modelling for environmental impact assessment[J]. **Journal of Materials Processing Technology**,1997,70(1-3):231-238.

[7] GINDY N. Sustainable manufacturing, life cycle thinking and the circular economy[J]. 机电工程,2010,27(6):1-6.

[8] 唐任仲. 中英低碳制造联盟揭牌仪式暨低碳制造研讨会在上海世博园举行[J]. 机电工程,2010,27(7):1.

[9] 王平心. 作业成本计算理论与应用研究[M]. 大连:东北财经大学出版社,2001:34-67.

[10] 任宇航,夏恩君,王建军. 基于作业成本法的武器装备制造费用计算研究[J]. 北京理工大学学报,2006,26(z1):17-20.

[11] 国家发展改革委应对气候变化司. 关于公布 2009 年中国区域电网基准线排放因子的公告[EB/OL]. [2009-07-02]. <http://wenku.baidu.com/view/420fda4e767f5acf a1c7cd1f.html>.

[12] DAHMUS J, GUTOWSKI T. An Environmental Analysis of Machining[C]//International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Anaheim, CA, United states: ASME,2004:643-652.

[13] DRAGANESCU F, GHEORGHE M, DOICIN C V. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy[J]. **Journal of Materials Processing Technology**,2003(141):9-15.

[14] MUNOZ A A, SHENG P. An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes[J]. **Journal of Materials Processing Technology**,1995,53:736-758.

[15] GHOSH S, CHATTOPADHYAY A B, PAUL S. Modelling of specific energy requirement during high-efficiency deep grinding[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**,2008(48):1242-1253.

[16] 艾 兴,诗 纲. 切削用量简明手册[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,1994.