

The Study about the Calculation Method of Product Carbon Footprint during the Flow Manufacturing Process

Youquan Tian, Qiong Liu

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

Email: Tian_cug@163.com

Received: Dec. 25th, 2013; revised: Jan. 20th, 2014; accepted: Feb. 5th, 2014

Copyright © 2014 Youquan Tian, Qiong Liu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Youquan Tian, Qiong Liu. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: For the lack of basic data for calculating carbon emission during the product life-cycle, and in order to solve the problem of the inaccurate calculation of product carbon footprint caused by flow manufacturing process, a calculation method of product carbon footprint in manufacturing process based on correspondence relations between the product and carbon emission is put forward. Finally, a case study is used to verify the effectiveness of the research.

Keywords: Low Carbon Manufacturing; Product Carbon Footprint

混流制造过程产品碳足迹核算方法研究

田有全, 刘 琼

华中科技大学, 武汉

Email: Tian_cug@163.com

收稿日期: 2013 年 12 月 25 日; 修回日期: 2014 年 1 月 20 日; 录用日期: 2014 年 2 月 5 日

摘 要: 针对目前产品全生命周期碳排放核算过程中缺乏基础数据, 同时为了解决混流制造过程造成产品碳足迹计算不准确问题, 提出一种制造过程碳排放与产品对应关系的产品制造过程碳足迹计算方法。最后通过简单实例计算, 验证方法的有效性。

关键词: 低碳制造; 产品碳足迹

1. 引言

环境问题日益严重, 已受到全球密切关注, 从《联合国气候变化框架公约》到“哥本哈根会议”, 各国都在为解决环境问题而努力, 此外, 2009 年 11 月 25 日的国务院常务会议决定: 到 2020 年将我国单位 GDP 的碳排放强度在 2005 年的基础上降低 40%~45%, 并将其作为约束性指标纳入今后中长期的国民经济和

社会发展规划。因此能将产品碳足迹更为清晰的体现出来, 让消费者直接识别的碳标签方法必将成为提高人们环保意识, 促进低碳发展的全新方法, 产品碳足迹的量化无疑成为碳标签实施的重要保障。

目前国内外对产品碳足迹的研究大多数集中于利用全生命周期法(Life Cycle Assessment, LCA)对产品生命周期过程中碳排放进行核算, Ahmad T. Mayyas

等人^[1]使用 LCA 对汽车生命周期碳排放进行评估,陶雪飞^[2]在陶瓷企业低碳制造系统的研究中,对陶瓷产品全生命周期碳排放进行了评估,尹瑞雪等人^[3]根据铸造产品全生命周期中的原料开采、运输、加工制造等过程中的碳排放源,建立铸造生产系统评估界限与方法,对铸造产品生产全过程输入输出控制特性进行定量分析,但以上文献对产品进行全生命周期碳排放评估时,由于产品制造的全生命周期在时间与空间上跨度较大,缺乏基础数据与标准,大多数数据来源于统计数据、文献、软件等,对核算结果的准确性有一定的影响,汪劲松等人^[4]也认为全生命周期系统边界难以划分,清单数据不足以进行有意义的比较。然而产品的全生命周期是由其过程中的各个制造过程组成的,因此从产品全生命周期的各个制造过程出发,准确核算出各过程的碳排放并提供给下一级制造过程,这样既能为产品全生命周期碳足迹的核算提供数据基础,又避免了核算过程中重复计算或者遗漏计算的情况。

孙良峰等人^[5]在进行辅助装备低碳化设计研究中提及复杂装备的基础零部件由于生产工艺稳定不变,其碳排放量一般为固定值,但对于现今较为普遍的混流制造企业,其产品制造工艺复杂、产品繁多,同种产品在不同的排产计划中的制造过程碳排放量也可能出现差别,因此如何能合理核算出混流制造过程中各产品的碳排放是产品碳足迹核算迫切需要解决的问题之一。Zhang 等人^[6]通过分析成品与零部件之间的 BOM 关系,根据各零部件在成品制造过程中的比重将已知成品的碳排放分配到各个零部件上,从而得到各个零部件的碳排放量,但该方法中已知的成品碳排放是根据行业标准所得,不能真实的反应出零部件在加工制造过程中的实际碳排放量;唐任仲等人^[7]提出一种基于活动的产品碳足迹核算方法,该方法提出采用车间制造层数据,根据各产品执行各个活动的次数将碳排放分配到各个产品上,但由于制造过程中产生的碳排放与加工工艺状况密切相关,不同的加工工艺对实际产生的碳排放可能有较大差别,可能会造成计算结果与实际情况不符的状况,因此在进行混流制造产品碳排放核算时,根据制造过程中碳排放源与加工工艺的关系合理确定各个不同产品的分配标准,才能更为准确的核算出产品制造过程的碳排放。

本文针对目前产品全生命周期碳足迹核算时基础数据缺乏的状况,采用经济学中用于成本核算的基于分配率的核算方法,从基础制造层出发,根据混流制造过程中各环节的碳排放量与各产品各道加工工艺的关系,确立相应的分配标准,从而将制造层的碳排放合理的分配到各类产品上,得到各产品在生命周期某阶段的碳排放量,为产品全生命周期的碳足迹核算提供真实可靠的数据基础,同时为企业节能减排提供分析参考依据。

2. 系统边界及核算方法

2.1. 系统边界

根据 PAS 2050 等^[8]相关标准中的规定,确定系统边界是进行碳排放核算的前提,在目前的大部分碳排放核算的相关研究中,通常将产品从摇篮到坟墓的整个生命周期作为研究的系统边界,但由于产品的全生命周期涵盖内容较多,时间与空间跨度较大,下游企业难以准确获得上游企业的碳排放数据,这对产品最终的碳足迹核算的准确性有一定影响,甚至会导致重复或遗漏计算。在用于建模和计算产品碳排放的 GaBi 软件说明书中^[9]提及产品核算边界有从摇篮到坟墓(cradle to grave)、从摇篮到大门(cradle to gate)、从大门到大门(gate to gate)、从大门到坟墓(gate to grave)这四种(图 1),由此可以认为:产品“从摇篮到坟墓”全生命周期碳足迹的量化问题可以分为供应链上多个“从大门到大门”的企业制造过程产品碳足迹量化问题,针对产品碳足迹核算时数据缺乏、边界过大难以计算的问题,本文提出将产品在某一阶段的制造过程(即“从大门到大门”)作为研究边界,该制造过程的产品碳排放准确的核算出来并提供给下游企业,以确保最终产品全生命周期的碳足迹的核算不会出现数据缺乏或不准确、重复计算或者遗漏计算的情况。

2.2. 核算方法

目前相关权威标准如 ISO 14064、PAS 2050 等对于碳排放的分类是根据其排放特性分为直接碳排放和间接碳排放,然而对于大多数企业在制造过程中的碳排放基本为间接碳排放,在企业产品碳排放核算时如果按照该类标准分类计算不能给核算带来便捷与方便,因此本文首先根据产品在制造过程中加工工艺

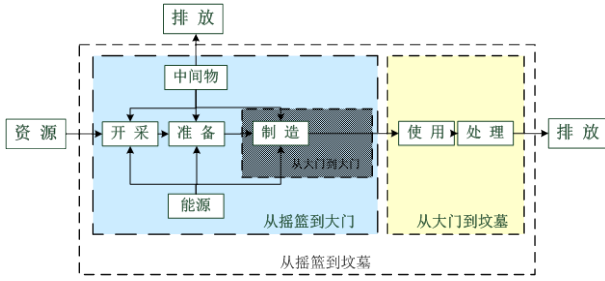


Figure 1. System boundary
图 1. 系统边界

与碳排放的关系，分为固定碳排放与可变碳排放：

固定碳排放：指在企业中，部分能耗产生的碳排放不因生产产品的种类和数量的变化而产生变化，如照明设施、通风设施等，称为固定碳排放；

可变碳排放：指在企业中，能耗产生的碳排放与生产产品的种类、数量、加工方式等息息相关，如设备耗电、冷却液使用等，产品的加工难易程度和数量多少会直接影响到碳排放量的多少，称为可变碳排放；

在确定碳排放的分类之后，根据各类碳排放与产品生产之间的对应关系建立不同的分配模型，然后根据制造底层采集的各类碳排放相关数据以及已建立的分配模型计算各类产品制造过程的碳排放。由于相关数据源于制造车间的基础数据，具有实时性与准确性，且计算模型充分考虑了碳排放与产品生产之间的关系，从而使计算结果更具有准确性与信服力。

3. 混流制造企业产品碳足迹核算

3.1. 对应关系

企业碳排放与产品之间的关系主要分为两种：一种是碳排放只与一个产品相关，该碳排全部计入该产品碳足迹；另一种是碳排放与多个产品相关，需按照一定的关系分配到各个产品上。

如图 2 是一个车间生产工序流程图，各道工序上有一台或多台设备可供选择，若设备上只加工一个产品(如图 2 中 2-2、2-3 等)，该设备上产生的碳排放全部计入该产品碳足迹中，若设备上加工多个产品(如图 2 中 1-1、2-1 等)，则根据设备加工时与产品的对应关系计算各产品碳足迹。

3.2. 混流制造企业碳排放分配模型

在企业制造车间，固定碳排放(照明、通风等)虽

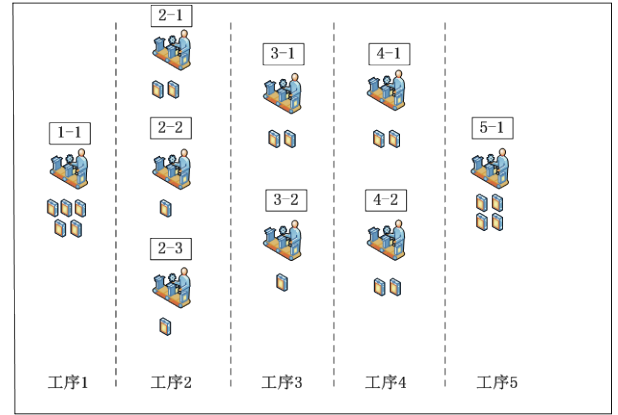


Figure 2. Diagram of workshop manufacturing process
图 2. 车间制造流程简图

然与产品加工无直接关系，但却是企业生产制造的基础，因此将固定碳排放基于均摊的原则平均分配到各个产品碳足迹中，如式 1 所示：

$$CF_{basic,i} = \frac{CE_{basic}}{n} \quad (1)$$

其中： i 表示产品种类， $i \in P, P = \{1, 2, \dots, n\}$ ； $CF_{basic,i}$ 表示由企业固定碳排放分配到产品 i 固定碳排放量； CE_{basic} 表示企业固定碳排放量； n 表示产品种类。

而对于企业的可变碳排放，即车间制造过程中各道工序中产生的碳排放，该部分碳排放主要涉及生产制造过程中各道工序中各个设备加工时的电能消耗、润滑油使用、刀具磨损、冷却液使用等资源的消耗，而不同产品加工时设备转速不同，所对应的设备功率、润滑油消耗、刀具磨损状况等均不相同，最终导致制造过程产生的碳排放也不相同，该部分碳排放与所加工的产品息息相关，需要根据设备加工与产品之间的对应关系进行计算。

对于只加工一个产品的设备(如图 2 中的 2-2、2-3 等)，由于该设备只加工一个产品，因此该设备功率消耗、刀具磨损等资源消耗产生的碳排放全部计入该产品碳足迹中，与其它产品无关，计算公式如式 2 所示：

$$CF_{j,i} = \sum_{r \in R} CE_{j,r} \quad (2)$$

其中： i 表示产品种类， $i \in P, P = \{1, 2, \dots, n\}$ ； j 表示设备， $j \in M, M = \{1, 2, \dots, m\}$ ； r 表示资源种类， $r \in R, R = \{\text{电能, 冷却液, 润滑油, 刀具} \dots\}$ ； $CF_{j,i}$ 表示产品 i 在设备 j 上加工时分配得到的碳排放量； $CE_{j,r}$ 表示设备 j 在加工过程中消耗资源 r 产生的碳排放量。

然而在现实情况中,各个设备上往往加工多个产品(如图2中的1-1、2-1等)。由于各个产品的加工工艺不同,从而在加工过程中设备的运转参数、功率消耗、刀具磨损状况、冷却液和润滑油的消耗量均不相同,此外,当不同产品在设备上加工转换时,设备处于空转时也会有一定的资源消耗,产生一定的碳排放,因此在这种状况下,产品碳足迹的核算需要根据实际加工过程中与产品的对应关系进行计算。

在设备上有多产品加工的情况下,各个产品的碳足迹分为两个部分组成:第一部分是该产品加工时设备运转功率、润滑油消耗等资源产生的碳排放,该部分碳排放完全用于这一种产品加工,应全部计入该产品的碳足迹中;第二部分是由于同一设备上加工不同产品进行转换时,设备空转阶段设备运转、润滑油消耗等资源产生的碳排放,该部分碳排放需根据涉及产品进行分配,本文提出将空转部分的碳排放按照调整前后两种产品在该设备上的加工时间比例进行分配,因此在设备上加工多个产品时,产品的碳足迹核算如下所示:

若产品在设备上第一个被加工,该产品涉及与后一个加工产品之间的工件转换,则该产品碳足迹由该产品在设备上加工时产生的碳排放以及与下一件工件转换时根据时间分配所得的空转阶段碳排放组成,如公式(3)所示。

若产品在设备上最后一个被加工,该产品涉及与前一个加工产品之间的工件转换,则该产品碳足迹由该产品在设备上加工时产生的碳排放以及与上一件工件转换时根据时间分配所得的空转碳排放组成,如公式(4)所示。

对于其它情况,产品碳足迹则由产品加工时产生的碳排放、与前一个加工工件转换时根据加工时间分配得到的空转阶段碳排放、与后一个加工工件转换时根据加工时间分配得到的空转阶段碳排放三个部分组成,如公式(5)所示。

$$CF_{j,i} = \begin{cases} \sum_{r \in R} CE_{j,i,r} + \frac{t_{j,i}}{t_{j,i} + t_{j,i+1}} \times \sum_{r \in R} CET_{j,i,r} & (3) \\ \sum_{r \in R} CE_{j,i,r} + \frac{t_{j,i}}{t_{j,i} + t_{j,i-1}} \times \sum_{r \in R} CET_{j,i-1,r} & (4) \\ \sum_{r \in R} CE_{j,i,r} + \frac{t_{j,i}}{t_{j,i} + t_{j,i-1}} \times \sum_{r \in R} CET_{j,i-1,r} \\ + \frac{t_{j,i}}{t_{j,i} + t_{j,i+1}} \times \sum_{r \in R} CET_{j,i,r} & (5) \end{cases}$$

其中: $CF_{j,i}$ 表示产品 i 在设备 j 上加工过程中分配得到的碳排放量; $t_{j,i}$ 表示产品 i 在设备 j 上的加工时间; $CE_{j,i,r}$ 表示产品 i 在设备 j 上加工时间 $t_{j,i}$ 内消耗资源 r 产生的碳排放量; $CET_{j,i,r}$ 表示设备 j 在加工产品 i 与 $i+1$ 调整时间消耗资源 r 产生的碳排放量。

最后,将产品在各个工序设备上加工得到的碳排放与分配到的固定碳排放累加即可得到产品制造过程中的碳足迹,如式(6)所示:

$$CF_i = CF_{basic,i} + \sum_{j \in M} CF_{j,i} \quad (6)$$

其中: CF_i 表示产品 i 制造过程碳足迹; $CF_{basic,i}$ 表示由企业固定碳排放分配到产品 i 固定碳排放量; $CF_{j,i}$ 表示产品 i 在设备 j 上加工过程中分配得到的碳排放量。

4. 实例应用

某轴类零件机加工车间需要加工四件产品,产品坯料材质为 45 钢,总共有四道工序,每个产品需要经过四道工序中的部分或所有,各个设备上均按照由产品 1 到产品 4 的先后顺序加工,各个产品在各道工序设备上的加工状况如表 1~6 所示。

各产品由坯料加工到完成原料磨损量如表 7 所示。

此外,在加工期间,企业由于照明、通风等基础设备消耗的电能为 8 Kw·h,转换成 CO₂ 的排放量为 4.32 kg-CO₂。

将以上数据带入公式(1)~(3)中计算得到各个产品碳足迹如表 8 所示。

若采用文献[7]的计算方法,仅根据各产品经历各活动的次数进行计算,得到的各产品碳足迹如表 9 所示。

通过表 8 与表 9 中各产品各个碳排放源的计算结果对比发现,两种方法的计算结果存在差异,而本文采用的方法是根据车间制造的加工时间来进行碳排放划分,比文献[7]根据产品参与活动的次数划分更能真是反映产品加工状况的碳排放。

此外,通过表 8 与表 9 中的数据对比发现,两种方法求得的结果差异较小,这是由于算例中产品均为轴类零件,各产品各工序间的加工方法较为接近,因此求得的结果差异变化较小。由此可见,对于大批量、单品种的制造企业,两种方法求得的结果差异会较小,

然而对于多品种、小批量制造企业，本文方法更能准

Table 1. Processing time (s)
表 1. 加工时间(s)

		设备			
		1	2	3	4
产品	1	300	-	450	600
	2	400	350	600	500
	3	-	550	500	700
	4	350	450	-	550

注：各表中“-”表示该产品不在此设备上加工。

Table 2. Processing power (kw)
表 2. 加工功率(kw)

		设备			
		1	2	3	4
产品	1	2.5	-	4	6
	2	3	5	3	6.5
	3	-	4	4.5	5
	4	4	5.5	-	6
空转功率		1	2	2	2.5

注：各表中“-”表示该产品不在此设备上加工。

Table 3. Adjustment time (s)
表 3. 调整时间(s)

		设备			
		1	2	3	4
产品	1				
	2	60	-	70	120
	3	-	120	90	90
	4	90	80	-	140

注：各表中“-”表示该产品不在此设备上加工。

Table 4. Flow of coolant (L/s)
表 4. 冷却液的流量(L/s)

		设备			
		1	2	3	4
产品	1	0.036	-	0.036	0.04
	2	0.03	0.04	0.032	0.036
	3	-	0.032	0.024	0.042
	4	0.026	0.03	-	0.03

注：各表中“-”表示该产品不在此设备上加工。

确计算不同产品的碳足迹，更能真实反映产品的加工状况。

5. 总结

本文针对目前产品全生命周期碳排放核算过程由于基础数据缺乏而导致核算结果不准确的情况，提出将制造过程作为核算边界，采用制造过程中的实时数据核算制造过程碳排放，并将结果提供给下一级制造过程，最终将各个制造过程的碳排放累加求得产品全生命周期的碳排放。本文根据制造过程中各工序间碳排放与产品之间的对应关系确立核算模型，并通过一个轴类加工车间作为算例进行核算验证。最后通过结果的对比分析，本文提出的核算方法与基于活动的碳排放核算方法在计算单品种、大批量制造企业产品碳足迹方面区别不大，但对于多品种、小批量制造企业产品碳足迹核算，本文方法更能准确计算出不同产品的碳足迹，更能区分不同产品由于加工工艺不同产

Table 5. Flow of lubricating oil (ml/s)
表 5. 润滑油的流量(ml/s)

		设备			
		1	2	3	4
产 品	1	1	-	1.2	0.8
	2	0.8	1	1.4	1
	3	-	1.4	1.8	0.8
	4	1.2	1.6	-	1.2

注：各表中“-”表示该产品不在此设备上加工。

Table 6. Carbon emission factor
表 6. 碳排放因子

资源名称	碳排放因子
电能	0.54 kg-CO ₂ /Kw·h
润滑油	0.047 kg-CO ₂ /L
冷却液	0.017 kg-CO ₂ /L
45 钢	3.22 kg-CO ₂ /kg

Table 7. Amount of cutting (kg)
表 7. 磨损量(单位: kg)

产品	1	2	3	4
加工前	4.2	3.8	3.65	4.75
加工后	4.06	3.53	3.48	4.51
磨损量	0.14	0.27	0.17	0.24

Table 8. Calculation result of product carbon footprint (kg-CO₂)
表 8. 产品碳足迹核算结果(单位: kg-CO₂)

产品种类	基础设施	加工设备电能	冷却液	润滑油	产品转换空转	材料磨损	合计
1	1.08	0.9225	0.867	0.062	0.0374	0.4508	3.4197
2	1.08	1.2	1.0744	0.095	0.0876	0.8694	4.4064
3	1.08	1.1925	1.003	0.105	0.0967	0.5474	4.0246
4	1.08	1.0762	0.6647	0.085	0.0402	0.7728	3.7189

Table 9. Calculation result of product carbon footprint-2 (kg-CO₂)
表 9. 产品碳足迹核算结果 2(单位: kg-CO₂)

产品种类	基础设施	加工设备电能	冷却液	润滑油	产品转换空转	材料磨损	合计
1	1.08	0.9718	0.8229	0.0779	0.0563	0.4508	3.4597
2	1.08	1.293	1.0785	0.1067	0.0763	0.8694	4.5039
3	1.08	1.1256	0.8977	0.0904	0.0688	0.5474	3.8099
4	1.08	1.0005	0.8099	0.07	0.0603	0.7728	3.7935

生的碳排放的差异。

参考文献 (References)

- [1] Mayyas, A.T., Qattawi, A., Mayyas, A.R., et al. (2012) Life cycle assessment-based selection for a sustainable lightweight body-in-white design. *Energy*, **39**, 412-425.
- [2] 陶雪飞 (2011) 陶瓷企业低碳制造系统模式及评估与建模方法.
- [3] 尹瑞雪, 曹华军, 李洪丞等 (2012) 砂型铸造生产系统碳排放量化方法及应用. *计算机集成制造系统*, **5**, 1071-1076.
- [4] 汪劲松, 段广洪, 李方义等 (1999) 基于产品生命周期的绿色制造技术研究现状与展望. *计算机集成制造系统-CIMS*, **4**, 2-9.
- [5] 孙良峰, 裘乐淼, 张树有等 (2012) 面向低碳化设计的复杂装备碳排放分层递阶模型. *计算机集成制造系统*, **11**, 2381-2390.
- [6] Zhang, X.F., Zhang, S.Y., Hu, Z.Y., et al. (2012) Identification of connection units with high GHG emissions for low-carbon product structure design. *Journal of Cleaner Production*, **27**, 118-125.
- [7] 唐任仲, 贾顺, 吕景祥 (2011) 基于活动的产品车间制造过程碳排放量计算方法. *机电工程*, **6**, 639-644.
- [8] Sinden, G. (2008) PAS_2050.
- [9] GaBi Paper (2011) Clip tutorial-part 1.