

让学习变得更简单

PTC 特别版

产品可持续性

for
dummies[®]
A Wiley Brand



面向更低
足迹的设计

—
高效制造

—
可盈利的服务和循环

呕心巨献



戴夫·邓肯

关于PTC

从飞机到医疗设备，再到风力涡轮机和计算机，PTC独特的软件解决方案组合能够帮助企业改变他们设计、制造和维护产品的方式。

作为产品生命周期管理领域的全球领导者，PTC的软件支持整个产品生命周期的数据管理，帮助简化产品复杂性，推动实现卓越的工程和设计、高效制造和供应链以及运行和服务优化。

PTC可以为各种规模的企业提供助力，因为其拥有丰富的数字技术组合、广泛的合作伙伴网络和行业专业知识。PTC软件可以为产品生命周期的每个阶段提供支持，包括引领市场的产品生命周期管理（PLM）、软件应用生命周期管理（ALM）、计算机辅助设计（CAD）和服务生命周期管理（SLM）。

PTC的30000多家客户中不乏汽车、航空航天和国防、工业机械、医疗技术、电子和高科技等主要垂直制造领域的标杆企业和颠覆性创新企业。PTC致力于帮助客户取得成功，并与他们密切合作，为其数字化转型提供支持。

PTC的企业使命不仅在于构想更美好的世界，更在于帮助创造这样的世界。企业的价值观、可持续性倡议、社会影响相关工作和软件解决方案无不体现了这一企业使命。



产品可持续性

PTC特别版

戴夫·邓肯著

for
dummies[®]
A Wiley Brand

产品可持续性傻瓜书®，PTC特别版

出版商

John Wiley & Sons, Inc.

里弗街111号，

里弗街111号，邮编07030-5774

www.wiley.com

版权所有© 2025年，John Wiley & Sons, Inc.，新泽西州霍博肯。保留所有权利，包括用于文本和数据挖掘、人工智能训练的技术以及类似技术。

未经出版商事先书面准许，不得复制本出版物的任何部分，或将其保存于检索系统，或以电子、机械、影印、录制、扫描等形式或方式传输，但根据《1976年美国版权法》第107条或108条规定获得准许的情况除外。如需向出版商申请许可，请将申请发往John Wiley & Sons, Inc.许可部门，地址：新泽西州霍博肯市里弗街111号，邮编：07030，电话：(201) 748-6011，传真：(201) 748-6008，也可访问以下网址：<http://www.wiley.com/go/permissions>。

商标：威利 (Wiley)、傻瓜书 (For Dummies)、傻瓜书人像标识 (Dummies Man)、傻瓜书之路 (The Dummies Way)、Dummies.com、让一切变得更简单 (Making Everything Easier) 以及相关商业外观，均为John Wiley & Sons, Inc和/或其关联机构在美国以及其他国家所持有的普通商标或注册商标，未经书面许可，不得使用。PTC和PTC标识是PTC公司的注册商标。所有其他商标均归相应所有权人所有。约翰·威利父子公司与本书中提及的任何产品或供应商无任何关系。

责任限制/免责保证：出版商和作者对本作品内容的准确性或完整性不作任何陈述或保证，同时特别声明免除一切保证责任，包括但不限于适用于特定用途的适用性保证。销售或促销材料不构成或提供任何保证。此书中提及的声明和策略不一定适用于所有情况。所提供的信息仅作为一般指导，并非旨在传达任何税收、福利或法律建议。购买此书时，应了解出版商不涉及提供法律、会计等专业服务。如需任何专业协助，请向有资质的专业人士寻求服务。出版商和作者均不对由此造成的损失承担责任。此书中提及某个组织或网站作为引用和/或潜在的进一步信息来源的，并不意味着作者或出版商认可该组织或网站提供的信息或建议。此外，读者应注意，在您阅读此书时，此书撰写过程中所列出的网址可能已发生改变或消失。

关于我们其他产品和服务的一般信息，或者如何为您的企业或组织定制傻瓜书 (For Dummies) 图书，请联系我们设在美国的业务开发部，电话：877-409-4177，电子邮箱：info@dummies.biz，网址：www.wiley.com/go/custompub。关于傻瓜书 (For Dummies) 品牌产品和服务的许可信息，请发送电子邮件至：BrandedRights&Licenses@Wiley.com。

ISBN: 978-1-394-36833-4 (pbk); ISBN: 978-1-394-36835-8 (ebk); ISBN: 978-1-394-36836-5 (ePub)。印刷版可能存在部分空白页面，ePDF版可能不存在这些空白页面。

出版商致谢

为本书上市做出贡献的部分人员如下：

项目经理和开发编辑：

卡丽·博切菲尔德·莱顿

高级执行主编：列夫·门格尔

选稿编辑：特拉奇·马丁

高级客户经理：马特·考克斯

PTC合作作者：

埃琳娜·昂斯特、肖恩·麦格拉思、

阿什莉·普鲁伊特、

妮科尔·德怀尔、詹姆斯·诺曼、

克里斯滕·韦尔斯·格里菲思、

布拉德·多尼根

制作编辑：玛格什·伊兰格凡

目录

引言	1
关于本书	2
傻瓜式假设	2
书中使用的图标	3
更多相关信息	4
第一章 统一产品可持续性认知	5
定义可持续性	5
我们产品的负面影响	7
合规——“大棒”	8
盈利能力——“胡萝卜”	9
运用生命周期思维减少足迹	10
第二章 解决生态与合规问题	11
找出问题所在	11
九个“行星边界”	12
脱碳	13
有限资源保护	14
管控问题	16
环境产品声明	17
有害物质法规	17
脱碳法规	18
循环法规	21
第三章 协调可持续性和商业价值	23
脱碳价值	24
减少零件设计中的材料用量	25
用嵌入式软件实现去物质化	26
改善供应商数据与优化供应商选择	27
平衡材料选择标准	27
分布式制造	28
模拟可制造性	29
EPD自动化	29
循环价值	30
模块化设计	31
派遣技术人员作为最后的手段	32
订购维修备件作为最后的手段	33
基于环境足迹的产品差异化	34

第四章	可持续设计原则	35
	洞察生命周期中的DFS价值.....	35
	获取DFS智慧.....	36
	适用于离散型制造商的DFS框架.....	37
	组件级.....	37
	产品级.....	39
	产品服务系统级.....	40
	管理现实世界中的DFS排序.....	40
第五章	运用全生命周期思维管理环境足迹	41
	生命周期思维指导.....	42
	生命周期清单优先级.....	43
	运行足迹.....	44
	上游足迹.....	45
	下游足迹.....	46
	循环.....	47
	生命周期数字主线.....	48
	工程中心.....	49
	资产中心.....	50
	整合PLM BOM和资产中心.....	51
	特定配置的作业指导书.....	51
	基于设备的预测.....	51
	数据驱动的设计和服务.....	52
	增强型人工智能的价值.....	52
第六章	在保持盈利的同时减少环境足迹的 十个生命周期技巧	53
	运用全生命周期思维.....	53
	利用模块化硬件和软件实现循环体系.....	54
	不要忘记一线工作人员.....	54
	将您的EPD视为完善BOM的一项功能.....	55
	考虑DPP的优势.....	55
	现在就采取行动，开展能让CFO开心的环境足迹减少工作.....	56
	考虑在对品牌至关重要的主题上发挥引领作用.....	56
	获得碳价值直觉.....	57
	获得循环直觉.....	58
	使用可持续性要求建立数字主线.....	59

引言

更 优质、更环保、盈利能力更强的产品——产品可持续性一直是空泛的战略口号，是时候由像您这样的领导者在从产品设计、制造、维护到报废的全生命周期中将它付诸实践了。只有采取行动，产品的环境足迹才会改善，约 80% 的产品足迹取决于设计决策（包括制造和维护规划），所以您才是生态和商业体系的主角，可以决定能否以可盈利的方式实现产品可持续性。

对大多数人而言，*可持续性*是一个快速发展的新兴领域。所以，如果您缺乏经验知识，请不要担心；读过本书之后，您很快就能与最好的专家合作。可持续性从业者是一个包容开放、乐于接纳的群体。

想一想高等院校的校内体育活动。如果您在上大学后想学踢足球，可能会很困难，因为大多数球员从小就开始踢球了。但对于极限飞盘，大多数人都是新手，所以您可以很快上场并为团队做出贡献。

产品可持续性就像极限飞盘。您只需要掌握基础知识就可以上手了。在本书中，我将强调我认为正确的三个要点：

- » **在产品可以盈利时，产品足迹减少就具备可持续性。** 未来五到十年内，您完全有可能通过采取本就该为经济利益而采取的行动，减少产品一半甚至更多的环境足迹。随着更多的工艺和技术正在逐步普及，使您能够在21世纪30年代在保持盈利的同时解决掉剩余的大部分环境足迹。
- » **把政治排除在讨论之外。** 政治情绪总是变幻无常。科技的发展一定会催生品质更佳、成本更低且环境足迹更少的产品，而且产品会因其耐用性、节能效果和供应链韧性而会受到普遍赞誉——无论您属于哪一政治阵营，抑或是您保持中间立场，这一趋势均不可逆转。

- » **您不需要彻底改变当前的工作方式。** 已退休的系统设计工程总监戴维·根特指出，产品生命周期从业者已经在质量的多个维度（性能、功能、可靠性、一致性、耐久性、可维护性、美观性和感知质量）上进行成本权衡了。您只需要增加第九个维度：可持续性。

所以，拿起您那不含PFAS、100%可回收的二手聚乙烯飞盘，和我们一起开始吧！

关于本书

本书共有六章，分别将探讨以下内容：

- » 统一产品可持续性认知，确定主题和您应当关注的方面
- » 产品导致的问题和推动减少环境足迹的法律环境
- » 商业案例——协调减少环境足迹行动与财务优先事项
- » 可持续设计（DfS）原则
- » 运用全生命周期思维管理环境足迹
- » 在保持盈利的同时减少产品环境足迹的十个生命周期技巧

每一章都是独立的内容。如果您对某个话题感兴趣，可以直接阅读相应的那一章。您可以按照适合自己的任何顺序来阅读本书。

傻瓜式假设

可持续性是个广泛的话题，但产品可持续性则更具针对性。因此，我为读者的您做了以下粗略的假设：

- » 首先，您想了解离散制造产品的可持续性。此类产品包括飞机、火车、汽车、鞋类、X光机、烤面包机烤箱、智能手机、电梯、推土机、阀门等设备，以及几乎任何其他砸到脚上会让您

2 产品可持续性傻瓜书，PTC特别版

感到疼痛的坚固设备。本书不涉及流程制造内容，包括石油、天然气、化学品、食品、啤酒、大宗原材料和其他基于配方的产品。

- » 其次，您的职业背景是产品生命周期从业者或企业可持续性人员（或者主管这些职能的高管）。在产品生命周期方面，您可能总管或专门负责一系列广泛的职能，比如工程、制造规划、服务管理、IT、产品管理、采购、合规等。
- » 即使您并非从事离散制造业的产品或可持续性相关岗位，本书仍然仍然值得一读，有助于了解这个行业如何减少足迹。

书中使用的图标

为了让您关注书中的一些重要项目，我会偶尔使用特殊符号。您会看到以下符号：



谨记

这个图标提醒您，相关信息值得反复回顾。



提示

希望通过提示、建议、观察评论等形式提供一些有用或有帮助的知识，便于您利用来自其他实施过程的经验。



警告

警告图标是要引起您的注意，避免落入陷阱、圈套等安全隐患。请特别注意书中的这些部分，有助于您避免不必要的障碍。



技术资料

这个图标可能带来以下两种处理方式：技术迷将会专注于接下来丰富而重要的内容；其他人则可能会高兴地跳至下一段。

更多相关信息

本书是一个不错的入门读物，但全书只有64页，所以某些主题的剖析深度会受限。如果您想知道在哪里可以了解更多信息，请访问[PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book)。我也会在书中反复引用这个链接，这样您就可以通过一个方便的链接获取所有资源。

- » 了解可持续性
- » 洞察我们产品的影响
- » 确保合规性
- » 追求盈利率
- » 运用生命周期思维减少足迹

第一章

统一产品可持续性认知

可 持续性涉及众多领域（这个词本身就很复杂！），所以要准确定位自身目前所处阶段并非易事。本章将会探讨产品可持续性的原则，以及产品生命周期从业者对离散产品产生最大影响的环节。后续章节将进一步深入探讨这些主题。

定义可持续性

1987 年，联合国布伦特兰委员会对可持续性进行了定义，该定义至今仍然适用。可持续性是指既满足当代人的需求，又不损害后代子孙满足其需求的能力。我们都喜欢舒适的家居环境、便利的交通、充满冒险的假期和营养丰富的一日三餐。您一定希望自己的子孙后代世世代代都能享受繁荣的自然环境，同时拥有同等甚至更优越的享受美好生活的机会。可持续性的核心理念在于平衡美好生活与环境保护，您需要以可再生的方式使用产品和服务，而非只是耗费。

可持续性包括三个分支：环境、社会和治理。这三个分支可以进一步细分，如图 1-1 所示。图 1-1 中的浅色方块可能是您在产品生命周期管理中重点关注的领域（不过某些产品，比如火警报警器或武器，可能会带来正面或负面的社会影响）。

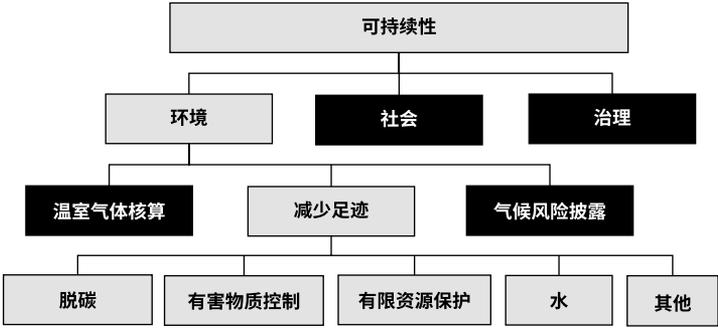


图 1-1: 离散制造中产品生命周期从业者普遍关注的可持续性重点问题。

您可能听说过“ESG”一词与“可持续性”可互换使用。ESG 代表环境、社会和治理，以联合国制定的 17 项可持续发展目标（SDG）为基础。这 17 项目标的前提是，即使我们具备可以更好地保护环境的技术手段（如今我们大体上确实已经具备），但如果公民和国家不相互配合，我们就永远无法以所需的速度和规模来实施那些手段。（别担心；此处不会涉及政治立场讨论。继续读下去，我会解释如何让您所做的贡献保持政治中立。）

“无贫穷”（目标 1）等社会目标和“和平、正义与强大机构”（目标 16）等治理目标对于推动实现环境目标（E 目标）不可或缺，我在本书中重点关注的正是环境目标。所有产品生命周期从业者都要在环境（E）领域发挥作用，利用科学支持的技术和商业价值实现环境目标。17 项目标中，我关注的两项目标是

- » 目标 9 — 产业、创新和基础设施：这些是产品生命周期的设计元素。
- » 目标 12 — 负责任消费和生产：这些是产品生命周期的制造、服务和循环执行元素。



技术资料

与供应链人权相关的一些社会（S）目标，构成产品设计阶段材料和零部件选择的重要合规性项目。不过，您不能直接对供应商进行评估。您的采购团队将代为履行该职责，并根据冲突矿物的合规性和其他因素向您提供核准供应商名单。

我们产品的负面影响

在上一部分中，我把环境（E）目标确定为本书在联合国可持续发展目标框架内的主要 ESG 焦点。在这一部分中，我将介绍您的企业必须改善的环境问题。第 2 章会进一步详细阐述。

我们的产品通常对环境产生三个显著的负面影响：

» **有害材料：**汞、铅和镉等有害物质会危害人体健康并破坏生态系统。最新研究表明，塑料也可能带来严重危害。钢铁和铝等金属在产品中大多呈惰性，但其开采过程会留下尾矿，进而可能对水体和土壤造成污染。

就采矿而言，尾矿是矿石分选工艺后残留的废料。

» **温室气体排放：**在产品生命周期中，凡是涉及化石燃料燃烧的生产或使用环节均可能会产生温室气体排放。例如，燃油汽车在行驶过程中会燃烧汽油而排放温室气体。还有一些机器虽依赖电力运行，但这些电力的上游发电厂可能会燃烧煤炭或天然气等化石燃料。即使是无动力产品，在其制造过程中也包含了隐含碳排放。**注意：**一些产品的活动可能会排放制冷剂等额外的温室气体。

隐含碳是指在产品整个制造过程中，包括采矿、材料加工、生产制造及运输等环节所产生的温室气体排放总量。

» **有限资源耗竭：**有限资源耗竭指的是地球岩石圈中的金属、矿物和石油等可开采资源数量有限。如果我们继续以线性方式消耗资源，比如继续使用柴油卡车或对报废产品进行焚烧和填



技术资料



技术资料

埋，那么在未来某个时刻，子孙后代将不再拥有这些生产性供应链。

企业环境责任通常会通过自愿承担的方式消减这些外部效应，从而推动商业价值的提升。越来越多的法规正迫使企业承担责任。

合规——“大棒”

合规就是遵守法规，我将在第 2 章对此进行详细介绍。有害物质合规在各个行业已推广实施大约 20 年。您所在的组织可能已经制定有成熟的有害物质管控体系。

与有害物质管控不同，脱碳和循环是新的合规领域。尽管许多国家都制定有国家层面的相关法规，但全球的推动力量是欧盟（EU）的《企业可持续发展报告指令》（CSRD）。CSRD 涵盖了广泛的 ESG 主题，同时也适用于全球范围内出口产品到欧盟的出口商。因此，凡是在欧盟市场销售产品，或与对欧供货的供应商合作的企业，都可能受到此类合规要求的约束。

对于产品生命周期从业者来说，CSRD 及其相关规定迫使制造商

- » 衡量产品足迹
- » 承诺量化环境足迹减少的数值
- » 从报废的零件和产品中回收材料



谨记

从经济学家的视角来看，全球变暖是管理温室气体排放外部效应的市场机制失灵。监管“大棒”越来越多地被用于解决这种外部效应。

从纯商业角度来说，不合规的代价巨大。首先是法律处罚，具体处罚情况因国家/地区和贸易集团而异。对于企业对企业（B2B）制造商来说，与失去业务的风险（客户可能会取消不合规供应商的资格）相比，这些处罚可能显得微不足道。



提示

不要把合规视为阻力。相反，它能提高产品设计标准，创造公平的竞争环境，并带来利润丰厚的全新商业机会。

盈利能力——“胡萝卜”

在合规性背景下，您的商业理由可以非常简单，“老板，我们必须这样做！”但若仅将合规视作经营成本，则难以获得差异化投资，实则其中蕴藏更高价值的商业机遇。

产品可持续性的核心在于提高对准确确定价值和效率优先事项的关注度。然后，为这些优先机遇匹配经过验证的前沿解决方案。即使不考虑合规价值，结果仍与业务优先事项保持一致：

- » 通过回收利用、轻量化设计、避免废料和嵌入式软件，降低材料和零部件成本。
- » 通过节能、再制造和翻新，降低生产成本。
- » 设计专注于客户价值，巧妙避免过度设计。
- » 通过提升耐久性、效率和嵌入式软件创新，增加初始销售收入。
- » 通过高效服务、产品升级和副产品市场，增加售后收入。
- » 提高供应链的透明度和抗风险能力。
- » 利用品牌声誉和绿色溢价拓展市场。

此乃明智之举！该列表对企业 and 环境都有好处，还能帮助企业主规避法律风险。



谨记

在产品可以盈利时，产品足迹减少就具备可持续性，而盈利能力是您所追求的“大棒”（参见前一部分）上的“胡萝卜”。先专注于较易实现的目标，再逐步攻克更困难的环节。在当前商业环境下，可再生能源电气化、去物质化、分布式生产和服务化等模式已被证明具备盈利能力。另一些机遇虽然尚未实现规模化，但当前能带来先发优势，未来也可能成为第二阶段的可行选项。有关价值细节的深入内容，请参见第3章。

运用生命周期思维减少足迹

过去的可持续性举措侧重于运营环节的环境足迹——主要是在足迹可见的工厂运营中：减少废料，降低能耗，以及在可行的情况下转用可再生能源。此外，在存在合规性要求或可实现盈利的场景中部署碳捕集设备。

然而，在既要符合 CSRD 合规性要求又要满足投资者和客户期望的新环境下，制造商需要在产品的整个生命周期中对环境足迹负责，而不仅仅是在工厂内负责。制造商如今需对入厂原材料与零部件在上游供应链各个环节中产生的所有环境影响负责，包括采矿、运输、原材料加工及初级加工环节。制造商还需对下游（售后）影响负责，即产品的运行能耗、服务和废弃物足迹。



在离散制造中，通常有 1% 到 10% 的足迹来自运营层面。另外的 90% 到 99% 来自上游和下游。把可持续性的重点放在工厂运营上已不再有效——责任需要延伸到整个产品生命周期。由于这个原因，产品生命周期从业者对于解决方案至关重要。企业需要完善的流程和数字化支持系统，以便在保持盈利的同时，持续优化产品的环境足迹。

请参阅第 4 章了解有关可持续性设计原则的更多内容，第 5 章将会详细介绍这些原则在产品生命周期中的应用。

- » 探讨产品如何危害环境
- » 了解减轻危害的法律

第二章

解决生态与合规问题

本章的主题对于理解您需要解决的产品可持续性问题至关重要。我不希望您在阅读这些内容时过于沮丧。您只需知道，利弊总是并存。

在本章中，您将了解产品如何危害我们的环境，以及哪些活动会产生最大的负面影响。您也会看到我如何介绍促使制造商减轻这些产品外部效应的法规。

找出问题所在

如今的制成品完全不具备可持续性。它们会污染地球，使地球变暖，并消耗有限的资源。您的营销部门在发布产品声明时，应避免使用诸如*可持续产品*或*绿色产品*之类的词语。虽然您可能会持续向净零足迹迈进，但就目前而言，最好还是使用*更具可持续性的产品*之类的措辞。



技术资料

净零排放指的是大幅减少企业的温室气体排放（通常比初始水平减少90%以上，因为碳去除有实际限制），然后通过购买碳去除手段抵消剩余排放，从而实现总体净排放为零排放。

九个“行星边界”

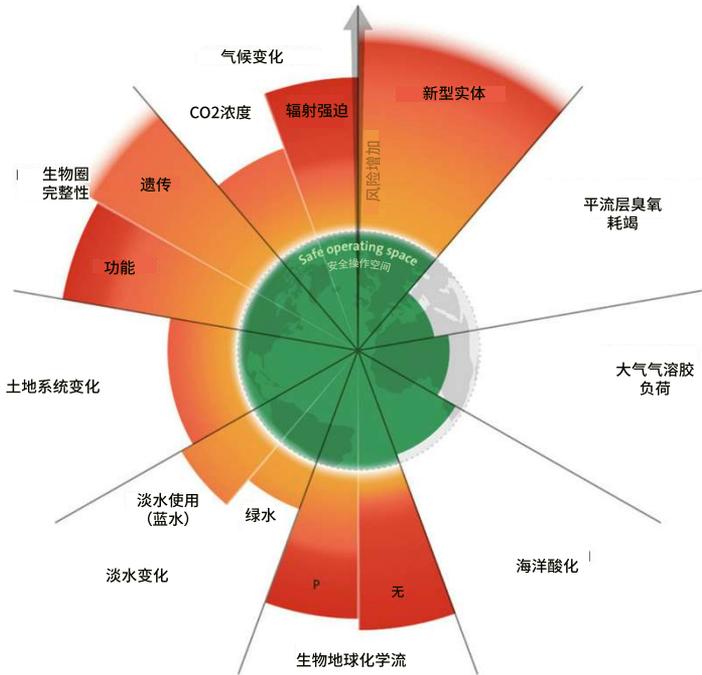
地球拥有稀薄的大气层（空气）、稀薄的生物圈（地面和土壤）和厚实的岩石圈（地壳和地幔），因为它们我们才得以生存。80多亿人在地球上四处奔走，追求富裕世界的生活水平，为这些生命维持系统增加了新的压力。

斯德哥尔摩恢复力中心利用九个“行星边界”来追踪这些问题。这一框架阐明了人类活动对地球造成破坏的九个负面维度，如图2-1所示。处于安全操作空间内的界限在长期来看是可以接受的，而超出安全操作空间的那些边界不可接受。需要将这些边界恢复至安全操作空间之内，最好是在大自然采取极端平衡措施之前以得体的方式进行。

如图2-1所示，许多安全操作空间已被破坏，这幅图可能看起来让人悲观，但每个边界都有改善的方法。平流层臭氧耗竭边界便是一个成功案例，这是20世纪80年代末最广为人知的边界失守案例。制冷剂和其他化学物质破坏了大气臭氧层，原本可能导致人类和其他生物遭受过量辐射。幸运的是，技术有应对之法（成本合理的替代化学物质），而各国领导人也有应对之意（《蒙特利尔议定书》）。现在，这个边界状态最佳，臭氧层正在“愈合”，您仍然可以享受负担得起的空调和冷饮。

在离散制造中，产品可能对其他边界有所帮助。例如：

- » 精准农业利用先进的拖拉机、播种机、无人机等避免过度使用肥料和杀虫剂。此举优化了生物化学流动。
- » 水处理技术有助于使淡水更清洁、更安全。



资料来源：阿索特，斯德哥尔摩大学斯德哥尔摩恢复力中心。
 基于理查森等人（2023年）、斯特芬等人（2015年）和罗克斯特伦等人（2009年）的研究。

图 2-1：九个“行星边界”。

如果您有这些能提供帮助的产品，向您致敬！您的治愈力量将会获得市场的奖励。



警告

九个边界中有几个边界遭受的损害来自产品。一个例子就是新型实体（微塑料等有害物质）。另外两个是气候变化和海洋酸化（均由温室气体排放引起）。幸运的是，就像平流层臭氧耗竭边界一样，您拥有越来越多的技术方法和商业上可行的手段可用于改善这些边界条件。

脱碳

脱碳是减少温室气体（GHG）排放的行为。温室气体排放主要是二氧化碳，但也包括甲烷等其他温室气体。

许多人认为气候变化是九个“行星边界”中最紧迫的边界。在离散制造业中，温室气体排放主要来自整个价值链中化石燃料的燃烧。



警告

图2-2说明了这一问题。森林里倒下的大树等生物圈物质在燃烧后可以迅速循环成新的植物物质。然而，化石燃料已在深层岩石圈中封存了数百万年时间。它们燃烧后的气体进入地球大气中会造成碳失衡，因为它们无法自己循环回到岩石圈中。

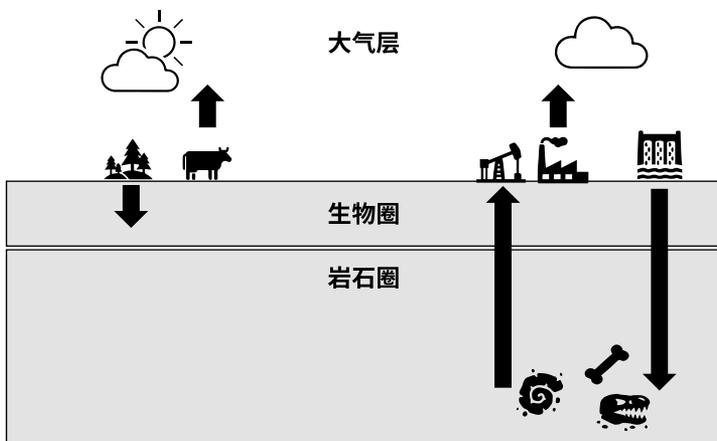


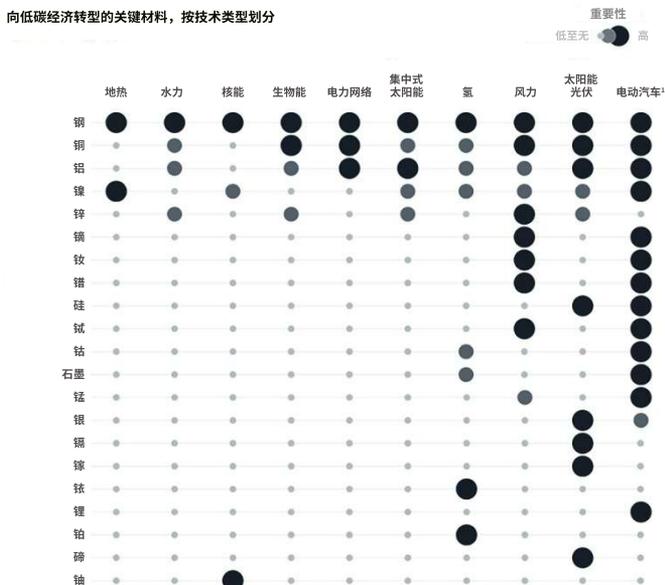
图2-3：对经济至关重要的有限材料。

Climeworks和Charm Industrial等供应商的碳去除机器可以将碳泵回岩石圈。乐观地说，到21世纪30年代和40年代，诸如此类的碳去除技术可以实现规模化，以负担得起的价格将目前排放量的10%泵回岩石圈。要想通过碳去除技术实现净零排放，您不需要完全停止使用化石燃料，但您确实需要大幅减少化石燃料的使用量，并使用更清洁的混合物（天然气燃烧的清洁度比煤炭高50%，石油介于两者之间）。

有限资源保护

离散制造业有责任减少化石燃料的使用和控制有害物质。若要把更多的煤、石油和天然气留在岩石圈中（出于环境和成本原因），那么在未来数十年里，我们需要从地下挖出大量的金属和矿物，用风力涡轮机、电池、太阳能电池板、核电站和智能电网等来取代我们的能源基础设施。

如图2-3所示的麦肯锡图表显示了能源转型对原材料的相对需求。家用电器产品、汽车、飞机、家用电器和医疗设备等其他产品也需要这些材料。



¹包括储能。
资料来源：欧盟战略技术和行业的关键原材料，前瞻研究，欧盟委员会，2020年3月9日；关键矿物在清洁能源转型中的作用，IEA，2021年5月；麦肯锡分析

图2-3：对经济至关重要的有限材料。

请访问PTC.com/beyond-the-book了解更多关于图2-3的信息。

美国、欧洲、日本、韩国和其他工业经济体的问题是，这些材料在国内通常供应不足。因此，虽然循环可以带来显著的环境效益，但它现在会受到国家安全法规的推动，确保关键材料始终在经济体内使用。



谨记

循环在先进制造业国家之所以能够持续，源于其经济必然性。如果没有足够的原料，生产线就会停工。

管控问题

为了减少离散制造的混乱，法规会强制对有害物质控制、脱碳和循环采取行动。法规是您在产品规划和设计中要考虑的市场条件。

不过，可持续性法规和标准的覆盖面之广可能令人生畏。法律和合规部门会管理这些方面，并引导您完成需要您参与的环节。幸运的是，对于生命周期从业者来说，关键法规可以归结为一个简短的产品生命周期计划中通常引用的预期行动清单。表2-1引用了这些内容。

表2-1 推动减少足迹的法规

法规或指令	与产品生命周期的相关性
《企业可持续发展报告指令》（CSRD）	要求范围内的企业报告它们对环境的影响。欧盟制造商及其全球供应链可能在范围内（想想世界上几乎每一个中型和大型离散制造商）。
《企业可持续发展尽职调查指令》（CSDDD）	与CSRD相关。CSRD要求披露，而CSDDD要求行动。要求企业以可审计的方式减少对环境的影响。特别关注脱碳和循环。
《化学品注册、评估、许可和限制》（REACH）	对任何含有广泛物质清单（241种物质且仍在增加）中的物质的产品进行有害物质管控。
《有害物质限制》（RoHS）	电气和电子设备的有害物质管控。只适用于10种物质。
《报废电子电气设备指令》（WEEE）	循环设计加上制造商支付的税款，用于资助政府回收中心收集电子垃圾。



谨记

不用担心是否需要成为法规专家。作为生命周期从业者，您在合规方面的贡献通常可以归结为衡量您的产品足迹和持续减少足迹。

环境产品声明

对可持续性的预期结果之一就是环境产品声明（EPD）。EPD就像是产品的营养标签，表明它对环境的影响。图2-4为EPD样本，衡量产品的环境影响，包括能源使用情况、碳排放、海洋酸化、水污染、平流层臭氧耗竭和地面臭氧污染。

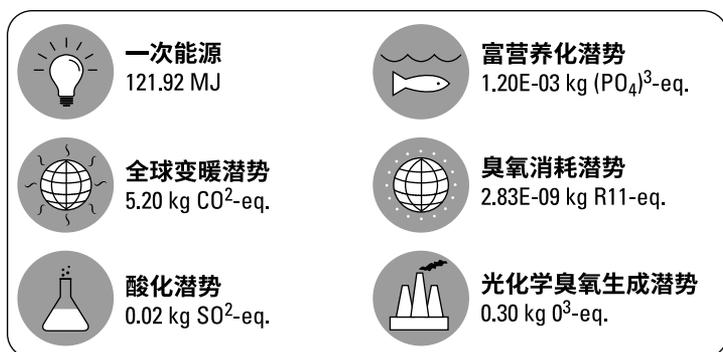


图2-4：EPD样本。

EPD是更广泛的生命周期评估（LCA）的汇总输出。虽然精明的消费者可以使用EPD来为购买决策提供信息，但如今EPD更常用于企业对企业（B2B）交易。若以面向消费者的简化格式呈现EPD，这种情况可能会随着时间的推移而改变。



提示

您的物料清单（BOM）程序可以帮助LCA和EPD实现高度自动化。

有害物质法规

对于有害物质法规，例如REACH和RoHS，它们采用了类似的方法：最理想的做法是，完全不使用这些有害物质，在规定的痕量范围内除外。如确需使用，则必须证明它在制造、使用和报废期间既不会伤害人类接触者，也不会损害环境。



技术资料

全氟和多氟烷基物质（PFAS）预计将成为下一类受类似管控的有害物质，但截至本书出版日期，其监管尚未形成统一标准。若您涉及任何耐热、防油或防水产品，您可能需要解决PFAS问题。

脱碳法规

CSRD要求对温室气体排放进行测量，CSDDD则是推动科学减排目标（SBT），促进实现净零排放。当然，您必须首先衡量您计划改进的方面。

温室气体核算体系

财务会计有用美元等计量单位衡量交易的规则（比如公认会计原则），同样，温室气体核算也有自己的规则手册，叫做《温室气体核算体系》（GHG Protocol），用来衡量温室气体排放量（计量单位是公吨二氧化碳当量，或MTCO_{2e}）。温室气体核算有几个叫做**范围**的类别，每一个类别均旨在鼓励某些企业行为。与生命周期从业者最相关的是

- » **范围1 — 直接排放：**在自有和租赁的办公室、工厂和车辆中燃烧的燃料（与供应商燃烧的燃料相反）。推动制造商用电力或其他潜在的可再生能源取代工厂燃烧的化石燃料。此范围也要求企业通过避免调度和转换为电动卡车来减少服务车辆的排放。
- » **范围2 — 间接排放（发电）：**此范围由煤炭、天然气或石油产生的棕色电力使用组成。严格来说，购买的蒸汽能也算在这里。推动企业用绿色能源取代棕色能源，即可再生能源发电。（**注意：**核能被被誉为低碳能源，但不被视为可再生能源，不过它仍是减少范围2的一个选择）。
- » **范围3 — 间接排放（价值链）：**这涵盖在您的价值链中产生的排放，包括上游（在您的产品组装之前）和下游（在您的产品销售之后）活动。范围3有子类别，通常对您的产品有重要意义的子类别包括：

- **3.1 — 购买的货物和服务：**这包括入厂原材料中所包含的隐含碳。隐含碳累积自入厂原材料在上游供应链各个环节的排放，包括采矿、运输、原材料加工及初级加工环节。它促使企业选择低碳供应商，并减少材料使用量。
- **3.4 — 运输和配送：**这包括供应链物流环节的排放。它促使企业转向环境足迹更低的运输方式（地面运输与空运，可再生能源提供动力与化石燃料提供动力）。此范围子类别也推动分布式制造业利用本地供应链。
- **3.11 — 已售产品的使用：**这是燃料燃烧或不可再生能源产生的电力，供客户为您的产品提供动力。此类别促使企业用存在的可再生能源（主要是电气化）取代以化石燃料为动力源的产品。
- **3.12 — 报废处置：**这包括在运输、焚烧或分解已报废零件和产品过程中排放的碳。它推动企业迈向循环性（进而有助于范围3.1实现高碳效率的供应）。

您的企业不会要求您计算整个企业的碳足迹，因为这些排放包括办公活动、商务旅行等活动的排放。但他们可能会要求您计算产品碳足迹（PCF）。就温室气体核算而言，PCF包括

- » 产品供应商材料和零件的隐含碳，包括运往工厂的运输过程（范围3.1和3.4）
- » 您的工厂使用不可再生能源制造产品的排放（范围1和2）
- » 产品生命周期内预期运行所使用的不可再生能源排放（范围3.11）
- » 预期的报废回收或处置排放（范围3.12）

服务调度和维修备件、运营运输和上游燃料是可能在范围内的其他领域，但通常对足迹的影响较小。

这方面的管理似乎是一项艰巨的任务，但您的产品生命周期管理（PLM）系统可以提供帮助。一份完备的BOM可以管理计算PCF的数据。包括要在材料、零件和配置级别累加的碳和其他属性。

净零排放承诺

您的脱碳责任的另一部分是使用基于科学的方法，推动PCF实现净零排放目标。CSRD和CSDDD要求许多企业对基于科学的减排进行审计，做出净零排放承诺。这需要在企业层面实施，但因为大多数制造商的排放主要源自其产品，因此您的公司依靠您来推动大部分的减排。

图2-5说明了基于科学的净零排放途径，包括以下内容：

- » **基线测量：**这是您的企业的起始足迹，随后的减排将从这里开始。
- » **2030年近期承诺：**在2030年或之前，您的基线范围1 + 2必须减少至少42%。此外，您的最高范围3领域，通常是您的供应链范围3.1，必须减少至少25%。
- » **2050年净零排放承诺：**在2050年或之前，您的净排放必须减少到基线的90%以下。任何剩余的排放（10%以内）都需要购买可审计的碳去除，以达到净零排放。

碳去除有实际成本，但在您宣布净零排放日期之前并非必需。例如，您可能有一个材料供应商在2051年仍然使用以化石燃料为动力源的加工机器。如果您订购的材料导致这台机器排放了1 MTCO_{2e}，则您的范围3.1将计入1 MTCO_{2e}。您的企业可以按市场价格（例如100美元）向Climeworks等公司支付永久封存1吨二氧化碳的费用。所以，您遵守了净零排放承诺，但您的材料实际上多花了100美元。

请访问[PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book)了解更多关于图2-5的信息。

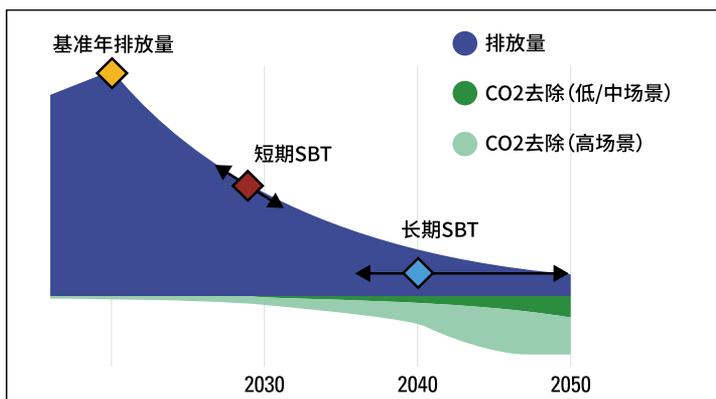


图2-5：脱碳路径。

循环法规

产品循环包括通过维修、再利用、翻新、再制造和回收来减少浪费。如今，WEEE推动了电子产品的基本回收，这与REACH和RoHS对电子产品中常见有害物质的报废控制密切相关。

从这个十年开始，对于电池制造商来说，数字产品护照（DPP）要求一些制造商对产品材料的循环回收负责，包括报废零件和产品。除了电池之外，其他产品领域也需要这些护照，但在本书出版时，该规定正式生效日期尚未确定。

图2-6中的护照跟踪记录了实体产品的影响总结和物料流动。它概括了材料成分、有害物质、碳足迹、用水量和产品的循环潜力。这些数据是已知信息，并会在售前发布。售后数据包括维修备件交易、维修备件退货证明以及任何报废转移或退货证明。

对于这些护照，究竟哪些产品需在售前与售后数据追踪方面达到何种程度，目前仍存有“即将揭晓”的期待。在早期阶段，序列化的昂贵资产比基于批次的非耐用产品更有可能需要售后跟踪。

概要

产品序列号: 4040425A1

产品制造商: Universal Exports

产品型号: Lightning-A.1

碳足迹: 1.2 kg

用水量: 14.5升

材料组成

1.23 kg 铝 (60%回收)

0.29 kg 不锈钢 (30%回收)

0.003 kg 钴 (0%回收)

活动台账

2024-11-18: 丹佛工厂制造

2024-11-19: 所有者XYZ收到

2025-01-23: 零件123与RMA 456交换

图2-6: 简化的DPP示例。

DPP需要强大的工程和服务数据支持系统。幸运的是，除了合规之外，护照还能提供大量的上行收入机会，我将在第3章中介绍价值。

- » 学习在保持盈利的同时减少足迹的技术
- » 重点关注脱碳和循环

第三章

协调可持续性和商业价值

在 产品可以盈利时，产品足迹减少就具备可持续性。宣传“这对地球有益”可能会招致反对，除非再加上一句“这是商业优先事项”。

幸运的是，可盈利的机会非常多，而且随着新技术的发展和规模效应的显现，这些机会也在不断增加。以下这些例子可以表明一些产品能在提供财务价值的同时颠覆环保性能更差的前代产品：

- » **消费品：**在价格类似的情况下，LED灯泡的耐用性是白炽灯泡的30倍，节省的能源成本是白炽灯泡的7倍。
- » **汽车：**电动传动系统大约有20个活动部件，而内燃机传动系统大约有2000个活动部件。充电比加油便宜50%到90%。电动汽车（EV）的加速性能比同等价格的内燃机汽车高50%左右。
- » **工业产品：**对于公用事业级别的扩建，太阳能和风力发电场通常比新的化石燃料发电厂更经济。即便是小型太阳能设施，其投资回收期通常也在5-7年之间。

- » **高科技产品：**与翻盖手机、GPS设备、数码相机、MP3播放器、计算器和手电筒的笨重组合相比，一部口袋大小的智能手机能以更低的成本轻松实现更多功能。
- » **航空航天：**齿轮传动涡扇发动机等先进的发动机技术、更轻的复合材料和经过改进的空气动力学性能使燃油效率提高了15%到20%。此外，座位密度提升8%，加上航班调度优化10%，每名乘客的能效将提高30%到40%。

本章重点关注脱碳和循环机会。与有害物质控制（第2章的内容）相比，脱碳和循环可以提供实现监管目标的灵活方法。除了合规价值之外，这些方法通常还能带来盈利。

脱碳价值

排放碳需要花费资金，避免不必要的排放活动可以为您节省资金。图3-1显示，麦肯锡深入研究了这一前提，并指出，到2030年，离散制造商可以在保持盈利的同时将碳排放量减少20%到60%。很多制造商的减排量都在50%到60%的范围内。

分析师对价值一致性的看法

弗雷斯特公司（Forrester）的保罗·米勒在2024年的一份报告中强调了减少足迹的商业机会：“2021年，工业部门的能源消耗在全球的占比为31%，重新分配的二氧化碳排放量达38%，该部门也是有限自然资源的重要消费者。能源和原材料成本上涨，加上环保法规日益收紧，使减少消耗和浪费成为明智的商业决策，即使是对气候变化最为怀疑的高管也会这样做。”



图3-1：同时能减少排放的成本效益。

请访问PTC.com/beyond-the-book了解更多关于图3-1的信息。



技术资料

电池和半导体的淘汰速度越来越快，因此更难做到在新产品中重复使用旧组件来减少碳排放。但是，CIMdata公司的马克·赖西格指出，在节能硬件、回收材料和优化供应链以减少碳排放方面进行投资的高科技公司在前18个月内的投资回报率（ROI）为10%到30%，这一数据可以为价值规模和速度提供支持。

本节会为您（产品生命周期从业者）介绍脱碳机会的一些行动。

减少零件设计中的材料用量

计算机辅助设计（CAD）软件可以提供生成式设计能力，并能通过性能仿真进行迭代优化，在声明的约束条件（几何、热、强度、制造工艺等）内优化材料使用。图3-2说明了生成式设计如何提出三种符合约束条件的方案，以此减少电动自行车转向杆的材料用量。工程师会综合考虑成本等其他衡量因素后选择一个方案。增材制造方案通常具有最低的材料使用量，但与减材制造方案相比，它们成本更高或产量更低。

支持这些优化方法的资深工程师对我说过，新聘用的工程师设计的零件比他们手动设计的更高效，即使他们有几十年的经验也难以与之比拟。CAD有助于减少材料，从而成比例减少材料供应商的隐含碳（范围3.1）和材料成本。另一个好处是轻量化，对于汽车等移动应用的能源效率具有显著的益处（范围3.11）。关于“范围”的介绍参见第2章。



图3-2：用生成式设计去除零件材料示例。

用嵌入式软件实现去物质化

减少材料的极端做法就是用软件代替一些机械部件。我自己的一次经历就能很好地说明这一点。我的电动汽车被召回了。车窗安全开关不能可靠缩回，可能会伤到相关人员的手指（比如小孩子在操控车窗时）。我当时心想，“完了。我可能要在经销商的等候室里坐几个小时，在嘈杂的环境中听他们说一些废话。”随后我进一步查阅资料，发现该汽车制造商指出，我的车型已经用软件取代了实体车窗传感器。他们只需为我提供远程软件更新，就能快速轻松地解决这个安全问题。

用软件代替这种车窗传感器为制造商节省了成本，减轻了重量，并减少了物料清单（BOM）中实体零件的隐含碳。这一方案也避免了召回技术人员的劳务支出和更换零件的费用。此外，作为一个品牌忠诚度持续提升的用户，我对这种“无需操心、睡一觉就修好”的主动且简单的服务体验感到很满意。



提示

要很好地做到这一点，需要一种贯穿应用生命周期管理（ALM）和产品生命周期管理（PLM）的系统性产品设计方法，以便模块化嵌入式软件可以为模块化机械设计提供补充。此类软硬件融合方案也需要建立对安全关键功能的全流程需求与测试追踪，比如我提到的电动车窗升降的例子。

改善供应商数据与优化供应商选择

对于大宗商品物料和零部件，其成本与环境足迹可能存在显著差异。各类风险同样呈现高度波动特性。让您的设计工程师（特别是BOM经理）与材料和供应链数据库建立连接有助于改进初始选择。随着供应商不断优化报价，他们也能精准识别成本较低的变更订单机会，从而减少成本、足迹和风险（更换大宗商品物料供应商几乎不会影响性能或制造工艺）。

平衡材料选择标准

大宗商品物料供应商的选择可以随时更换且成本很低，与此不同的是，零件材料的变更是一项重大工作，会影响几何形状、性能、工装模具和其他方面。

材料具有工程特性。这些特性不会随着时间或供应商的不同而改变。铜的热膨胀系数总是0.000017。如果您只需要管理少量材料，并且只关心其静态工程特性，那么您可以不使用商业材料数据库集成。

但是，对于可持续性，您需要管理材料数据的三个动态维度。

环境足迹、成本和风险属性

成本和碳强度等属性经常变化，也会因供应商而异。材料数据库通常与全球平均成本和足迹属性保持同步，但没有针对特定供应商的数据。这个全球平均值通常足够精确，有助于做出明智的材料选择（比如在铝与钢或钢等级A与钢等级B之间做出选择），以平衡成本、性能和环境足迹标准。供应商选择通常是后续的设计决策。

新型回收混合材料

钢材等常见材料拥有由回收成分加工而来的新型混合材料（比如80%的回收钢）。这些混合材料和加工方法不仅拥有不同的成本和环境足迹，而且具备不同的工程特性。回收钢无法直接等量替换原生钢来实现同等的强度、刚度等其他性能。

新材料

由于人工智能的发展和核心材料科学投资的增加，新材料正以惊人的速度涌现。将材料数据库与CAD和PLM决策者集成对于选择正确的材料非常重要。材料选择是高风险决策（对于成本、性能和环境足迹而言），在设计后期或生产之后更换材料需要耗费相当多的费用。此外，设计师必须跟踪材料在设计中使用的位置，检测和评估何时需要因为材料属性更新而更改设计。



技术资料

要了解新材料的涌现速度，不妨查阅一下谷歌的2023 GNoMe项目，该项目发现了380000种新型稳定材料。在此之前，人类只发现了48000种！请访问[PTC.com/beyond-the-book](https://www.ptc.com/beyond-the-book)，查看本书的资源页，获得更多细节的链接。

分布式制造

在全球市场销售的昂贵重型产品有很大的运输和海关费用风险。拥有全球装配厂的汽车制造商需要集中运送两吨的国际供应原料到其工厂，然后将两吨重的汽车运送到客户所在的地方。除了运输费用，可能还会有相当多的海关费用。如今的大部分运输费用都包括化石燃料成本，除了产品成本之外，也增加了隐含碳成本。

有了分布式制造，今天的大型汽车公司通常将装配工厂分布在当地市场（如美国、德国和中国）附近，拥有当地的供应链。这样可以节省成本和减少环境足迹，也能在供应链遭受台风、关税和冲突等情况的冲击时对冲风险。



提示

分布式制造对于汽车行业以外的其他行业也是一个机会。任何在全球范围内生产重型或昂贵产品的制造商都可以从中受益。但您需要管理不同工厂生产线和不同供应链所带来的更多波动性。模块化设计搭配制造规划可以帮助管理这些复杂因素。站在循环利用的角度进行前瞻规划，只要再制造过程比全新制造更简便，其分布式应用的潜力就会更大。

模拟可制造性

对于内部制造的零件（也被称为*制造零件*），成本优化通常与足迹减少相关。减少废料可以减少材料的隐含碳和成本。提升能源效率可以节省公用事业成本（当能源不是100%清洁时，也可以减少环境足迹）。

对于特定的制造工艺，仿真分析可以推荐几何形状、控制特性、处理方式和其他调整，以减少废料和能耗。仿真分析可以进一步提出材料和制造工艺的替代方案，以减少成本和环境足迹。

此外，可制造性仿真分析可以预测生产对产品环境足迹的影响，需要在环境产品声明（EPD）中汇总。这可以减少人工分析工作。

EPD自动化

手动生成带有产品碳足迹（PCF）报告的EPD成本高昂。估值各不相同，但通常在10000到50000美元之间。对于提供多种产品的制造商来说，这不仅成本高昂，而且由于环境工程师数量有限，人员配备也会遭遇瓶颈，无法满足新的PCF/EPD需求。



技术资料

幸好，PCF数据基本上可以在高质量的PLM BOM中汇总，并且这些BOM又能为生命周期评估（LCA）工具提供信息，在很大程度上实现EPD自动化。在可持续性方面，PLM BOM管理生命周期清单（LCI）数据，LCA软件根据这些数据计算生命周期影响评估（LCIA），并将其输出到EPD上。这种自动化的关键在于强大的PLM BOM，其中包含材料、零件、供应商以及关于隐含碳和活动足迹影响情况的配置级别属性等。其次是LCA工具，它可以接收这一BOM，进行计算，并将环境影响结果返回给PLM。

循环价值

循环的目标是保护有限的资源。最知名的全球循环框架是艾伦·麦克阿瑟基金会的蝴蝶图，因为它的细节非常丰富，本书无法复现，但绝对值得在网上查阅一下。请访问PTC.com/beyond-the-book了解更多信息。

循环包含有机物料流（堆肥和再生）和有限物料流。在离散制造中，我们主要涉及的是有限物料，比如金属、矿物、陶瓷、塑料等。随着时间的推移，工业会采用更多的生物材料，帮助进行可再生材料的安全堆肥，特别是对于一次性使用或高磨损零件。



谨记

有限物料循环的核心观点之一是，对我们来说，回收远非最优解。在回收之前，修理、重复使用、翻新和再制造都是值得考虑的更好方案。为了从经济学的角度说明这个问题，请参阅图3-3中的循环经济组织（Circle Economy）所提出的“价值山”模型。该模型证实了循环与商业价值相契合。

每个线性生命周期产品都需要从矿山开采原材料、材料加工和初级加工、最终组装、零售运输，以及运输到客户所在地。若产品损坏，或者用户不再使用该产品，扔掉它就会破坏所有五个层次的价值。最好通过维修、重复使用、翻新、再制造和回收（按优先顺序排序），在更高的层次上恢复和维护产品价值。

这听起来像是常识，但关键在于要能够盈利，而只有在具备适当的设计意图和有效执行服务的情况下才能实现盈利。

请访问PTC.com/beyond-the-book了解更多关于“价值山”模型的信息。

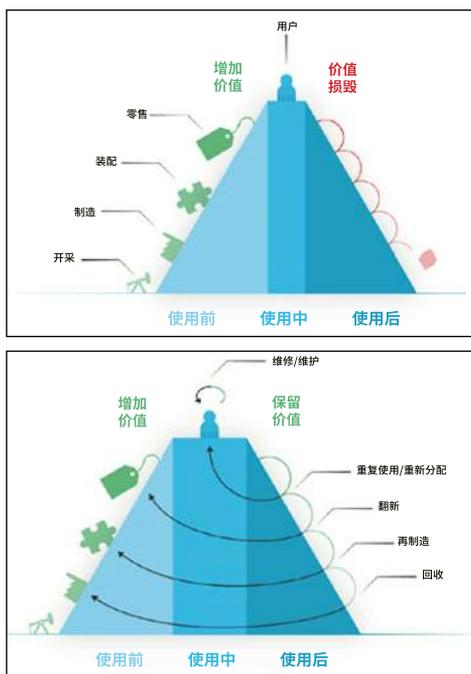


图3-3：价值山模型证实了循环与商业价值相契合。

模块化设计



谨记

模块化可以为零件重复使用、翻新和再制造创造供需关系，也能为经典设计提供便利，因为有些用户希望产品能使用更长时间，希望可以维护它们，并跨越多代产品循环使用。

一些知名玩具品牌凭借模块化价值，几十年来一直是市场冠军。我小时候玩过两个玩具平台，我的孩子们也很喜欢，并要求我们保管好，以后给他们的孩子玩（所以我们的阁楼放满了玩具），它们就是乐高和摩比世界。两者都是模块化设计的典范，它们的组件可以根据用户的需求重新配置为新产品。海盗游戏玩够了吗？那就把积木重建成太空站吧。消费者很少扔掉乐高或摩比世界。

汽车行业是另一个很早就采用了模块化设计的行业。您可以在任何一个汽车网站上按照自己的喜好配置汽车——发动机、颜色、车轮尺寸、天窗、雾灯、运动座椅、十个扬声器等等。这样，您不仅可以获得所期望的差异化配置，而且由于所有配置所需的零件种类有限，汽车制造商可以高效管理维修备件网络。模块化汽车能占领更广泛的买家市场，并推动高利润率的维修备件企业发展。即使是报废的汽车也具有商业价值，因其采用可拆解设计，便于重新利用可用零件和高效回收大部分剩余的分离材料。

若无模块化设计，超出基本回收的循环价值很难实现盈利。对于生命周期从业者，模块化设计涵盖软件、硬件和电子设备，且它们之间具有模块化相关性。模块化电池需要配套的模块化软件才能在不同的产品中工作。PLM中统一的工程BOM有助于管理这些模块化系统，并提供模块化ALM软件对象。需要模块化智能的下游衍生物包括制造BOM、服务BOM、拆卸BOM和一线工人作业指南。

派遣技术人员作为最后的手段

为了始终处于价值山（参见前一节“循环价值”）的顶端，产品需要采用可维修的设计。这样不仅可以延长产品的使用寿命，而且您的维修业务业能为增长和利润做出很大的贡献。

如今，所有制造商至少都提供有基本的保修服务，并且多数企业已迭代出多层次产品服务体系（延保合同、租赁方案、基于性能的合同等等）。随着制造商面临的服务成本风险不断增加，以成本最低的渠道服务客户成为了企业追求利润的目标。为了方便您阅读和查看，表3-1所示的低成本服务交付方案与环境足迹减少目标直接一一对应。



谨记

对于各个层级，特定配置的操作说明都必不可少。否则，模块化设计会让一线工人的工作变得复杂，因为他们很少在连续的任务中看到相同的产品。根据确切的配置筛选零件清单以及运营和服务流程可以节省时间和零件。对于循环至关重要，这些服务流程需要扩展到拆卸及零件和材料回收环节。

表3-1

服务交付方案

服务渠道	制造商成本	环境足迹
自助服务	\$ 无或呼叫中心	可忽略
远程修复	\$\$ 远程无线软件更新	可忽略
首次到访修复	\$\$\$ 派遣技术人员、零件	车辆里程、零件隐含碳
重复到访	\$\$\$\$\$ 派遣更多人员和零件	成倍增加的车辆里程、零件隐含碳

嵌入式软件是自助服务和技术人员服务的驱动程序（精确的警报和通知）。它也是进行远程修复的唯一方法，因为技术人员无法远程更换实体零件。

对于现场服务，以资产为中心的方法在优化效果方面远胜于基于预约的派工机制。以资产为中心的方法使用产品智能，首先尝试通过自助服务或远程服务，避免采用预约派工机制。若有必要派遣技术人员，它会远程分类和协调货车零件库存，为可能的修复做好准备（避免重复到访）。它也会计算何时可以将响应式到访与定期维护相结合。

订购维修备件作为最后的手段



谨记

维修备件网络值得特别关注，因为这些零件涉及大量成本和隐含碳。若您 是市值十亿美元的耐用消费品制造商，您可能会有数千万或数亿美元的维修备件库存，确保达成服务水平目标。

根据历史需求进行预测，部署多级优化（从中央仓库到卡车库存以及两者之间的位置）可以显著降低零件库存成本，同时提高服务水平。而且通过 PLM 数据和智能互联产品，您可以减少额外的成本和环境足迹。您的零件规划人员对具体的资产位置、合同级别、配置和状况越了解，他们就 越能减少您的库存和加急配送成本。

此外，您还可以跟踪循环使用模块化零件的回收流程。例如，若您的刹车盘通过再制造进行补货需要10天，那么针对超过10天的预测需求，您就可以避免从供应商处购买新刹车盘。您也可以衡量重复使用、翻新和再制造操作中通过避免购买新零件而减少的成本和环境足迹。这就是财务上可审计的循环价值。

基于环境足迹的产品差异化

在部分细分市场，消费者将为足迹更低的产品支付更高的价格。这部分收入被称为绿色溢价。次级市场包括做出了净零排放承诺的企业对消费者（B2C）和企业对企业（B2B）公司中具有环保意识的消费者。ABI Research公司的亚历克斯·麦奎因指出：“今天的消费者日益青睐可持续产品，在购买决策中越来越多地考虑产品的可持续属性。对于消费品公司来说，LCA已经成为一种有价值的工具，因为它们希望回应消费者对可持续性的期望。”



提示

此外，政府有时会对更环保的方法或产品给予补贴。充分利用绿色溢价和政府补贴，但要把它作为您的商业案例的动态促进因素进行管理。

- » 将DfS价值融入产品生命周期
- » 学习DfS智慧
- » 为产品生命周期从业者定制DfS框架
- » 了解现实世界中的排序

第四章

可持续设计原则

本章中，我将简要介绍可持续设计（DfS）的基础知识，可持续设计是一种最大限度降低产品对环境及社会的影响的产品设计实践。我也会深入探讨可持续设计，并概括性地为大家介绍一个适用于离散型制造商的DfS框架。

洞察生命周期中的DfS价值

产品约80%的足迹由设计阶段决定，因此从一开始就做出正确决策具有重要价值。随着时间的推移，更换材料、紧固件、几何形状、制造工艺、软件、售后服务方案或商业模式的成本会越来越高。

掌握前期DfS知识并参照需求系统的工程师可以在早期设计阶段做出更好的决策。

获取DfS智慧

目前，在以更可持续的方式设计离散产品方面尚无统一的指南（这也是撰写本书的原因之一）。幸运的是，DfS是一个不断发展的主题，而且目前有充足的资金支持，已有大量优质信息可供参考。在本节中，我将揭示自己获取信息的独家来源。

ISO14000系列涵盖DfS主题，但如今主要涉及较高层面。ISO14001（环境管理体系）实施分级认证制度，已吸引数千家企业参与认证。它在项目层面上非常出色，但没有为离散产品提供详细的设计指导。

在产品早期设计指导方面，生命周期设计策略（LiDS）轮是有效的快速参考卡。关于LiDS的更多详细信息，请参阅第5章。

互联网上可获取的设计指导的更深层次结构在于“面向产品生命周期各环节的设计”（“Design for X”）框架，该框架汇集了众多贡献者提供的公开资源与付费内容。所涵盖的相关学科如表4-1所示。

表4-1 可持续设计方法

DfX方法	与可持续性相关的目标
装配 (DfA)	便于制造和维修。
循环 (DfC)	调整商业模式和人为因素，支持材料回收。
拆卸 (DfD)	易于维修和报废回收机制有助于延长产品使用寿命。
能源效率 (DfEE)	降低产品运行能耗和耗材使用量。
物流 (DfL)	控制服务备件的采购以及航运成本和足迹。
使用寿命 (DfLG)	管理高磨损、低磨损零件，延长产品使用寿命，减少浪费。
制造 (DfM)	减少浪费和能耗。
回收 (DfR)	促进材料分离和高价值二次/循环利用。
再制造和翻新 (DfRM-DfRF)	帮助耐用模块和零件获得多个产品生命周期。

DfX方法	与可持续性相关的目标
维修和维护 (DfR-DfM)	延长产品的使用寿命。
重复使用和改造 (DfRR)	二次使用计划 (例如: 磨损的轮胎作为码头系泊设备)。
可持续行为 (DfSB)	鼓励最终用户负责任地操作、处置和回收产品。
使用 (DfU)	平衡能源使用和耗材与产品寿命。

除了这些ISO14000系列、LiDS轮和DfX研究领域之外，您还可以在PTC.com/beyond-the-book上找到其他推荐的书籍、博客、小组和资源。

适用于离散型制造商的DfS框架

该DfS框架将DfS研究 (参见前一节) 的大部分内容整合为可供产品生命周期从业者使用的中级成熟度矩阵。该矩阵由三个层级组成。本节将会详细分析每个层级。

图4-1直观地列出了这三个层级及其协同机制。

组件级



谨记

您在设计零件时，请记住以下减少环境足迹的注意事项：

- » **选择最好的材料。**除了强度等工程属性外，还需要考虑的材料特性包括碳排放强度、耗水强度、回收材料含量百分比、可回收材料含量百分比、毒性、供应商合规性和成本等因素。商业材料数据库集成不仅有助于材料选择，而且有助于在企业批准的材料中执行选择。若材料种类过多，会使回收流的报废材料分离变得复杂，但对于再制造循环来说可能没有问题。

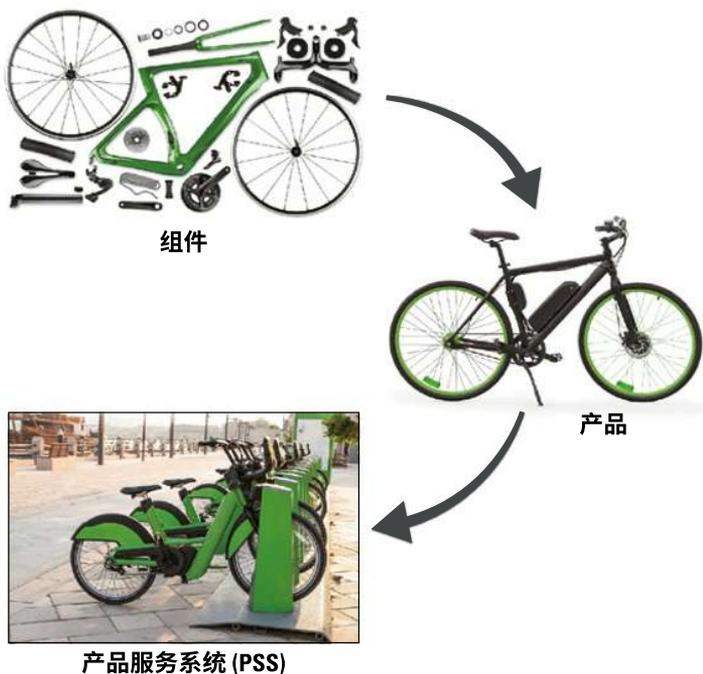


图4-1：适用于离散制造的DFS成熟度层级。

- » 尽可能减少选定材料的使用量。在性能、几何形状和外观的限制范围内，减少多余材料的使用。生成式设计和增材制造是有助于实现这一目标的两种有效手段。
- » 选择最佳制造工艺。这一点看似简单，但良好的评估可能需要循环回溯，回过头来重新考虑材料、几何形状和控制特性的选择。可制造性和成本模拟有助于这些预测和改进。

在这一层级，计算机辅助设计（CAD）是数字成熟度优化的核心系统，并可调用供应链数据（材料数据库）和各种仿真工具（生成式设计、性能和可制造性）。

产品级

这一层级专注于产品优化，特别关注“从摇篮到大门”阶段，即从材料开采获取到产品组装的整个产品生命周期。这一层级的主要考虑因素包括

- » **热点分析：**环境热点分析确定并衡量产品生命周期活动中对可持续性影响最显著的环节（通过碳当量、用水量、毒性等指标来衡量）。产品级分析的优点之一是，您可以根据减排潜力最大的环节，优先确定哪些零件值得投入环境足迹削减工作。
- » **低影响供应商：**选择低影响的材料和零件供应商可以减少范围3.1的排放。对于产品生命周期管理（PLM）用户而言，这主要适用于外购件，因为自制件材料的供应商选择通常由采购部门负责。待评估的环境足迹属性与材料相同，但供应商通常提供的是零件级数值，而非材料级。
- » **分布式制造：**对于客户遍布全球的重型产品，本地化生产可以节省成本并减少环境足迹。但是，本地化生产可能会导致复杂的可变性，比如模块化产品、属地化供应链及生产线。为了简化设计人员和工人的工作，PLM工程物料清单（BOM）可以派生出针对特定生产地点和配置的制造BOM、工艺方案和作业指导书。
- » **高效运行：**轻量化、电气化和热调谐等方法有助于提高产品的能源效率。PLM BOM可识别轻量化机会，并通过CAD生成式设计功能予以实现。其他能源效率分析通常通过集成在PLM workflow中的仿真来完成。

PLM是产品级DfS的数字化成熟度核心系统，集成了生命周期评估（LCA）、供应链数据库，并与CAD形成协同闭环，以实现组件级优化。

产品服务系统级

产品服务系统将产品与服务捆绑在一起，以满足客户需求。产品服务系统覆盖了“从摇篮到摇篮”的完整生命周期。这一层级包括产品和风险共担商业模式，需要考虑以下因素：

- » **延长初始产品寿命。** 产品应该拥有足够长的使用寿命，使用户能够获得相对于服务成本的最大化价值以及资产转售收益。为此，需要结合失效模式与影响分析（FMEA）、备件网络、零件目录、服务流程和技术人员覆盖率，进行服务规划。
- » **优化报废系统。** 规划良好的报废零件和产品应按以下优先顺序保持价值：重复使用、翻新、再制造和回收。

应用生命周期管理（ALM）、服务生命周期管理（SLM）和物联网（IoT）是企业推进到产品服务系统层级的重要补充。SLM能提升服务流程，并可合理扩展以促进材料回收循环。ALM可通过物联网支持的嵌入式软件提高服务效率和材料回收率。物联网互联产品可提供地理跟踪、空中下载更新、远程分类、智能预警、操作指引、回收跟踪等功能。

管理现实世界中的DfS排序

虽然框架成熟度路径是从组件级、产品级到产品服务系统级，但企业通常按不同的顺序实现DfS。成熟的企业更喜欢从产品级开始，并使用PLM BOM。根据新的环境法规，企业需要首先衡量众多产品的环境足迹，而每个产品都包含数百甚至数千个零件。接下来，为了推动减少环境足迹，他们可以优先考虑前百分之X的零件（根据您的需求选择一个百分比），用于组件级循环，实现在保持盈利的同时减少环境足迹。

成熟制造领域的初创企业和新平台往往从产品服务系统层级开始。凭借零历史包袱的先天优势，从这一层级开始，入行门槛较低，且能快速形成区别于传统竞争者的差异化优势。

- » 回顾生命周期思维指导
- » 为优先事项排序
- » 梳理生命周期数字主线
- » 整合PLM BOM和资产中心

第五章

运用全生命周期思维管理环境足迹

最

终，循环将挽救离散制造所面临的局面。目前，各个行业平均循环率低于10%，所以还有很长的路要走。

通过重复使用相同的材料，循环可以直接解决我们资源有限的问题。循环也能避免不必要的高能耗供应链返工，并确保材料可以安全使用。因此，循环可以在很大程度上帮助我们解决另外两个常见的挑战：脱碳和有害物质控制。

优化从材料购买到产品组装过程中的产品环境足迹（在可持续性领域叫做“从摇篮到大门”）已经不再足够。生命周期从业者需要评估其产品和服务的多代价值，并把运行、维护服务、重复使用和材料回收（叫做“从摇篮到摇篮”）考虑在内。



谨记

若要与用户建立回收循环，就需要在提供产品的同时提供服务。

本章中，您将了解用于管理全生命周期的流程和数字框架。值得庆幸的是，这不是一次彻底改革；相反，它是在当前产品数字化管理方式的基础上进一步拓展和延伸。可持续性只是一个额外的价值维度。

生命周期思维指导

在设计早期阶段融入可持续性的宏观判断与指导，将带来极为显著的价值。图5-1所示的生命周期设计策略（LIDS）轮是生命周期思维的有效指导。LIDS框架为设计师提供了顺时针生命周期的一般性准则，通过靶向评分体系量化八个维度的设计策略采用度打分（采用度越高，距离靶心越远）。每条建议看似浅显，但在早期设计决策中对系统进行整体统筹思考却至关重要。

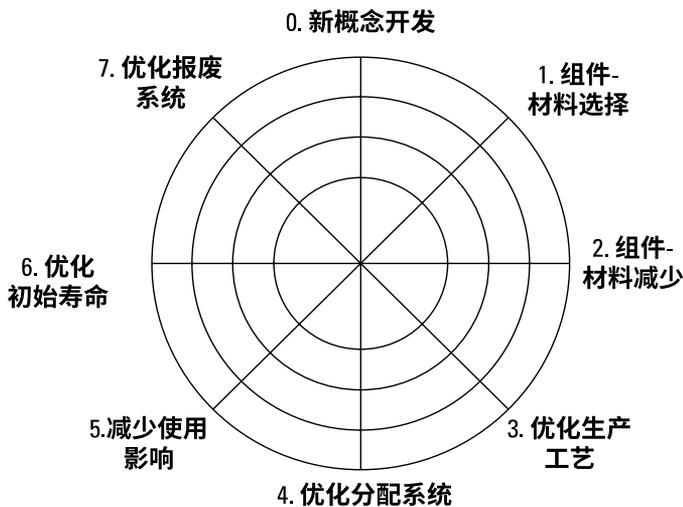


图5-1：LIDS轮。

请访问PTC.com/beyond-the-book了解更多关于LIDS轮的信息。

为了进一步把这种生命周期思维变成惯例，您可以将可持续设计（DfS）指导原则直接纳入您的需求管理系统中（“做正确的事”）。这些需求模板可先进行通用化制定，然后针对特定产品的需求进行衍生。用测试、设计和系统功能跟踪需求可以进一步确认设计师已将DfS卓越实践纳入其产品服务系统（“用正确的方式做事！”）。

对于使用基于模型的系统工程（MBSE）的组织，可以在设计早期在系统模型中对隐含碳、用水量和能耗、重量（针对移动产品）和毒性等可量化的环境足迹目标进行归因。这样可以为设计团队设置子系统目标，以便根据需要在系统级别执行或重新协商。随后，产品生命周期管理（PLM）、应用生命周期管理（ALM）、电子计算机辅助设计（ECAD）和其他支持系统可以汇总数值，验证整个系统是否实现了环境足迹目标。

生命周期清单优先级

图5-2构建了产品生命周期专家与可持续性专家之间的共识。

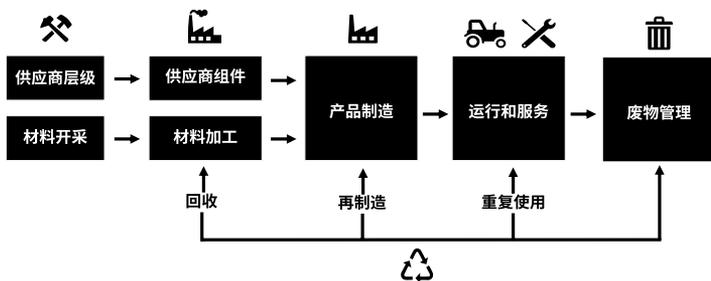


图5-2：生命周期清单。

产品生命周期专家会看到制造零件和购买零件流入工厂、组装产品配置，然后流向售后服务和报废阶段。

可持续性专家会看到环境足迹积累活动的生命周期清单（LCI）图表，这些活动最终将为生命周期评估（LCA）工具提供信息，用于计算产品的生命周期影响评估（LCIA）。

本节将详细介绍图5-2中的四个生命周期类别。

运行足迹

图5-2中第一个要分析的部分是制造，如图5-3所示。



图5-3：运行生命周期阶段：制造。

假设运行足迹来自您的工厂。单凭直觉，您可能认为工厂具有最高的环境足迹和优先级。工厂会产出废气、热量、废金属和有害物质废物，对吧？但实际上，出人意料的是，工厂对环境足迹的贡献较小，因此在我们的归因中优先级较低，原因有二。

- » 它通常只占离散产品环境足迹的1%到10%。与采矿、材料加工和其他上下游活动相比，离散制造主要涉及低能耗的转换和组装。
- » 工厂为了脱碳所采取的首要行动之一是使生产机器实现电气化（资本采购就能实现）。此外，工厂可以采购清洁电力（您的财务部门能通过太阳能、VPPA或其他投资方法来实现）。
注意：对于工业供热来说，氢气代替天然气也是一种常见的机械设备发展方向，因为氢气可以再生。双燃料燃烧器机器可以使用天然气，然后在氢气可用时切换为使用氢气。

不过产品生命周期从业者确实关注一些工厂环境足迹活动，主要与可制造性设计相关，目的是减少废料和能耗。这不仅包括机加工，还包括供一线工作人员使用的特定配置作业指导书。分布式制造也可以作为一项减少供应链距离的设计优先级。

上游足迹

图5-2中第二个要分析的部分是上游足迹阶段，也就是图中的前两个部分，如图5-4所示。

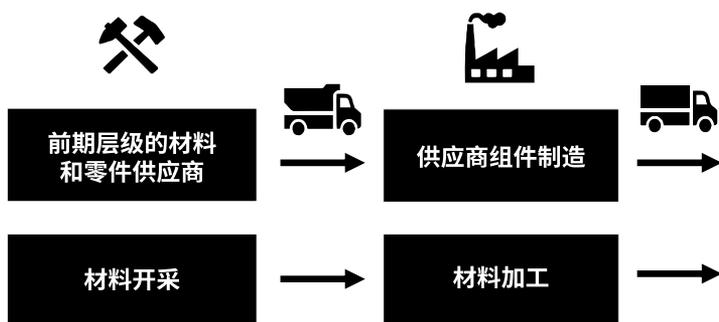


图5-4：上游足迹阶段。

对于大多数离散型制造商而言，入厂原材料和零件占产品环境足迹的75%到90%。我们以钢棒组件为例来进行说明。铁矿石在偏远的地方开采出来，沉重的岩石由卡车经过长距离跋涉运送至铸钢厂，在那里被加工成钢棒，然后钢棒再由卡车运送至您的工厂。这个过程会耗费大量能源，而且在今天的经济中，能源主要来自化石燃料。然后您的工厂会怎么处理钢棒呢？也许您会把它折弯，然后拧成一个装配件——这个过程能耗相对较低。

不仅仅是您的重金属和组件会产生上游足迹。更轻、看起来无害的电子产品可能会有更坏的影响。在笔记本电脑中，与更大更重的外壳甚至电池相比，处理器可能会排放更多的碳和废物。电子产品中含有稀土金属，它们的精矿重量通常只占矿石的5%到10%，然后需要额外的加工才能从精矿中提取出50%到70%的稀土金属。

您的可持续性负责人会把上游活动称为“范围3.1购买的货物和服务”。这不仅会导致您的产品有很大的碳足迹，而且监管框架也可能要求您减少这种足迹——基于科学的常见方法预计到2030年可将碳足迹减少至少25%。作为产品生命周期从业者，您最重要的1或2项碳足迹减少工作将集中在上游。这也是您的企业可持续性负责人常常给您最大压力，要求您迅速采取行动的领域。

下游足迹

图5-2中第三个要分析的部分是下游生命周期阶段。这些阶段是一个线性过程，也是图中的最后两个部分，如图5-5所示。

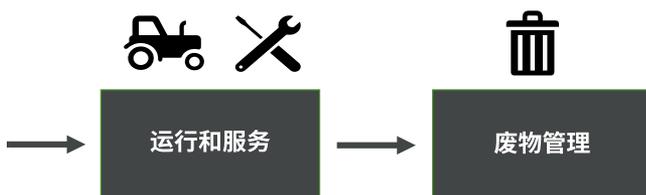


图5-5：下游生命周期阶段——线性过程。

制造商还需对下游（售后）影响负责，即产品的运行能耗、维修服务和废弃物环境足迹。若您制造的产品需要大量的电力，您可能会有很大的“范围3.11客户对已售出产品的使用”足迹。它甚至可能比上游还要高（对于今天的汽车和机器制造商来说，下游足迹通常占总足迹的95%以上）。根据燃料来源，您可能不得不对此采取积极的行动。

若您的产品的动力来源是电力或其他日益可再生的能源，那您就处于更有利的局面。由于您的客户使用的是煤炭和天然气发电的电网，今天您的范围3.11足迹可能很高，但到2050年，这些电网应该会采用清洁能源。因此，您可以借电网绿色化的机会来减少范围3.11排放。



警告

但是，如果您的产品以化石燃料为动力源，那么在不转向可再生能源的情况下，您无法做出净零排放承诺。提高化石燃料效率的机会有限。您的目标是电气化或转向另一种可再生能源，比如氢气技术。长途航空等部分行业尚无可以取代化石燃料的规模化技术，但大多数行业都有。

若您的产品是服务密集型产品，那么其他对环境足迹有重大贡献的因素包括卡车调度、维修备件、耗材和零件运输（特别是相对于标准地面运输方式的加急空运）。然而，下游总体环境足迹的比例仍然远低于上游。

注意：您的上游包括维修备件库存的隐含碳，因此需要尽可能地减少巨大的库存持有成本。

循环

图5-2中最后一个要分析的部分是循环下游生命周期阶段，它由图5-2的几个部分组合而成，如图5-6所示。

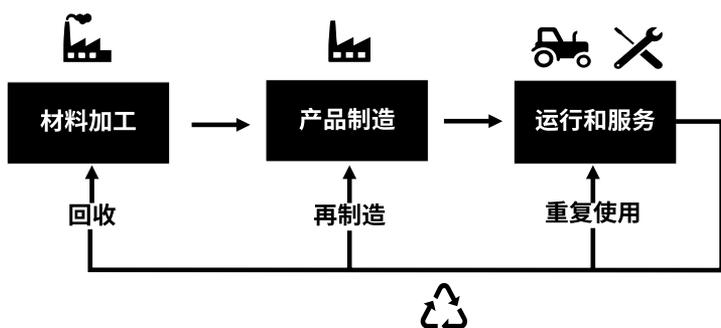


图5-6：下游生命周期阶段（循环过程）。



谨记

虽然您可能要重点减少上游环境足迹，但在保持盈利的同时实现目标的唯一方式是提高循环率。以笔记本电脑为例。与原生材料制造的笔记本电脑相比，一台性能如新且提供同等保修条件的再制造笔记本电脑在碳效率方面可能提升90%，原因如下：

- » **重复使用：**笔记本电脑的铝制外壳在第一次生产时能耗较高。但它很耐用，设计也很经典。您可能不会注意到全新笔记本电脑的外壳和已使用5年的笔记本电脑的外壳之间的区别。因此，外壳可以原样重复使用。不需要重新开采铝土矿，将其重新加工成铝，或将铝重新打造成笔记本电脑外壳。

- » **再制造**：笔记本电脑的键盘基本上可以再用5年时间。Q键用得并不多，但元音键已经磨损，需要再制造，或许还需要新的弹簧。不需要再通过采矿、材料加工或成型加工的过程获得塑料。键盘只需要稍作处理就能修复，并以几乎全新的状态投入运行。
- » **回收**：主板的运行速度已不再具有竞争力。我们的最佳做法就是粉碎它，分离材料，然后制造新的主板。这样，我们就能避免重新开采稀土金属的高环境足迹成本。

将这三种重复使用、再制造和回收流程加在一起，就能为再制造的笔记本电脑提升90%的碳效率，更不用说稀土金属保护和避免有害电子废物风险的好处了。再制造的环境足迹优势在其他垂直领域也很明显——根据我合作过的制造商的数据，降幅区间可达60%到95%。

生命周期数字主线

学习生命周期思维的原则是一回事，真正大规模实践是另一回事。要想做好这一点，需要强大的数字支持系统。您的产品数字主线有两个相互关联的中心，每个中心都对应一项新的监管要求（有助于您获得资金来构建这些中心）。

图5-7显示了工程系统中的产品数据与设计方案（也叫**配置规格**）的关联关系。运行系统中的产品数据与资产的序列号相关。

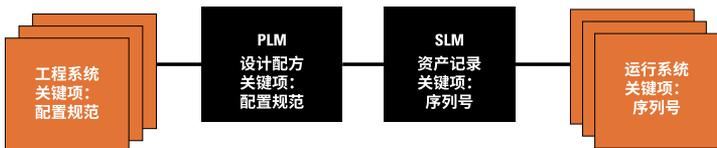


图5-7：生命周期数字主线。

工程中心

第一个中心是PLM系统中的模块化BOM。图5-8显示了您的足迹数据（或生命周期清单）在这一架构下的总体情况。材料数据库通过CAD在材料层级链接至PLM，在“制造零件”层汇总生产活动环境足迹。供应商组件数据库在“购买部件”层建立链接。在配置层，您的PLM BOM成为LCA工具的子程序，用来对设计期间的环境影响进行仿真分析，然后在设计结束时输出EPD。

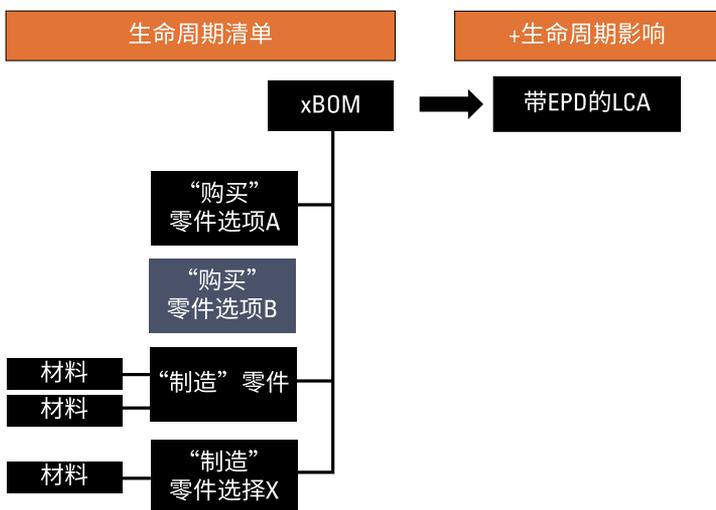


图5-8：模块化BOM汇总了产品的生命周期清单。



提示

对于工程数据，可持续性强调三个方面：模块化、供应链集成和新型仿真技术。从工程的角度来看，LCA是一种“环境仿真分析”。

除了模块化BOM的环境足迹汇总之外，ALM还以两种方式集成到BOM中。图5-9对这些集成做出了说明。首先，模块化软件零件与统一的BOM相关联，为实体零件提供补充。其次，ALM的管理需求跟踪到ALM测试和PLM设计对象，确保满足可持续性需求并具有测试覆盖率。

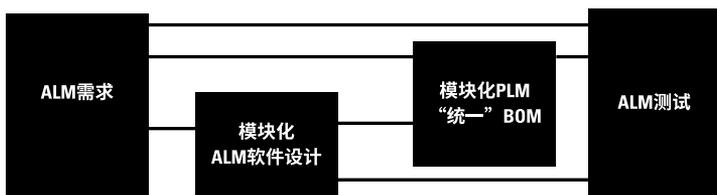


图5-9：详细说明ALM集成。

资产中心

第二个中心是实体资产记录系统，如图5-10所示。在资产诞生之初，该系统会从 PLM 中复制其 BOM 配方（如有生产订单细节，则可以作为它的补充）。

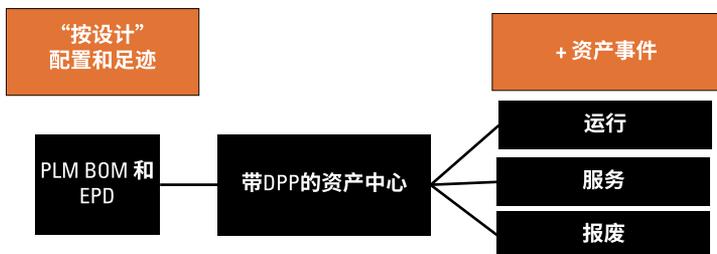


图5-10：数字产品护照（DPP）是资产中心的一个子集。

接下来，该资产中心管理一份有关重要活动的台账，可供所有者、服务提供商、设计师、保修审查员及其他相关角色使用。对于数字产品护照（DPP）工作流程，此台账包括但不限于位置、所有权和回收信息，用以证明使用过的材料和零件（以及最终报废产品）的循环回收。



技术资料

可持续性对资产数据有更多的供应链和售后集成要求。幸运的是，有一些明智且热衷协作的行业领导者正在开发交换标准。工业数字孪生协会（IDTA）开发了一套资产管理壳（AAS）服务，用于企业间和企业内部的资产数据交换。IDTA董事总经理迈克·比尔曼表示，AAS可在资产的整个生命周期内提供标准化的资产信息。这种一致性使AAS成为了循环业务模型的理想基础。

整合PLM BOM和资产中心

可持续性法规，特别是那些支持DPP的法规，正成为全生命周期数据支持系统的强制性驱动因素。这四个领域或许不那么显而易见，但可以显著增加利润并减少环境足迹，您可以借助该支持系统对其加以利用。

特定配置的作业指导书

在产品装配线、检验工位、操作场所、维护设施、现场服务车和再制造中心工作的一线工作人员需要最新的特定配置作业指导书。采用模块化设计（这是可盈利循环的要求）之后，他们看到的每一个产品都可能与之前的产品不同。

幸运的是，资产中心存储了他们所操作设备的配置参数，PLM可以使用这些参数来筛选作业指导书和零件列表。您的数字主线可以为一线工作人员消除差异性管理复杂度。

循环需要数字成熟度

IDC全球可持续发展研究与实践主管比约恩·施滕格尔表示：“可持续性从业者认为，缺乏能够帮助他们在运营和供应链中管理循环的软件，是在他们的业务中实施循环的最大运营挑战。与了解行业和业务特定需求的供应商合作，对于采用基于IT的可持续性方法和遵循循环经济原则的商业模式至关重要。”

基于设备的预测

如果您的企业销售维修备件，那么有两个数字可能会让您感到震惊。首先是维修备件的盈利能力——通常是初始产品销售利润率的四到五倍。其次是您所持有的库存大小。对于市值十亿美元的制造商来说，通常有数千万或数亿美元的零件储存在世界各地的货架和卡车上（这些零件有大量隐含碳）。

因此，维修备件优化软件可以帮助制造商在适当的位置储存适当数量的零件，实现服务水平目标。该软件至少会使用历史数据来预测未来的需求。但是，若它还了解零件属性，比如耐用性、产品配置、资产位置和资产状况，它就可以进一步减少数百万美元的库存，同时也能减少隐含碳。

数据驱动的设计和服务

数十年来，工程负责人和分析师们一直在谈论数据驱动的设计。理想情况下，设计工程师可以不断从现场设备中获得可靠的数据。有了这些数据，他们可以迅速应对过度设计和设计不足的问题。服务体系可规模化定制解决方案。

听起来不错吧？是的，但这通常只会出现在大学的黑板上，因为制造商很难获得可靠的现场数据。然而，随着护照的采用，您的资产中心获得了一个机会，可以快速收集您的企业能利用的产品生命周期数据。

增强型人工智能的价值

人工智能是一个新热点。它与可持续性有什么关系？答案简洁有力。可持续性是实现人工智能生成见解所需的丰富产品数据的催化剂。EPD和DPP需要贯穿整个生命周期的全面的结构化数据。人工智能能利用这些数据做些什么？能做的有很多，不只是减少环境足迹！

- » 推动循环
- » 把DPP纳入考虑范围
- » 让CFO开心
- » 建立数字主线

第六章

在保持盈利的同时减少环境足迹的十个生命周期技巧

产品可持续性是一个深刻的主题，随着社会关注度提升与资本投入加大，这一主题正在持续深化。无论您是先跳到本章快速了解重点内容，还是最后阅读本章，想要获得一些重点提示，您都会有所收获，本章将向您介绍在保持盈利的同时减少环境足迹的十个技巧。

运用全生命周期思维

在离散制造中，可能只有1%到10%的产品环境足迹来自您的工厂运营。另外的90%到99%来自上游和下游生命周期阶段：

- » 上游需要更多地关注材料选择和使用以及供应商组件选择。更好的数据和决策工具可以提改善供应链成本、韧性和环境足迹。

» 下游需要建立材料和能源的循环体系，比如模块化系统、零件回收、电气化和软件支持的服务。具有讽刺意味的是，下游循环体系是上游价值的关键杠杆，因为它能实现高效的零件重复使用、再制造和回收利用。

请参阅第5章了解更多关于这种生命周期思维的信息。

利用模块化硬件和软件实现循环体系

可盈利的循环体系需要模块化——这是为再制造零件创造供需关系的唯一途径。现代产品需要软件和硬件都采用模块化设计。例如，若没有一致的软件更新，利用产品A再制造的控制单元就不能重新部署到产品B上。软件也对可持续的用户行为、设备维修和回收跟踪有帮助。

不要忘记一线工作人员

循环产品需要模块化，而模块化也会提高可变性。可变性能为买家提供更多选择，有助于销售，但如果管理不当，它可能会增加一线工作人员工作的复杂性。不要忘记在您的模块化设计中考虑到这些一线工作人员。

一线工作人员在装配线、检验工位或客户现场看到的每个模块化产品都与他们之前看到的不同。因此，一定要利用数字化方式为这些工作人员消除变化带来的复杂性。



提示

为了帮助完成这项任务，利用产品生命周期管理（PLM）配置逻辑来为工作人员筛选他们正在制造或维护的确切产品的作业指导书。

将您的EPD视为完善BOM的一项功能

环境产品声明（EPD）看起来像是复杂得吓人的产品生态标签。您怎样才能找到并资助环境专家为您销售的每件产品手动计算EPD？

有了强大的物料清单（BOM）管理，您应该能够实现大部分或全部EPD工作的自动化。就可持续性而言，您的BOM可以根据碳排放强度、耗水强度、有害物质合规标志、回收材料含量百分比和可回收性等属性汇总产品的生命周期清单（LCI）。根据LCI，您可以为生命周期评估（LCA）工具提供信息，计算EPD的生命周期影响评估（LCIA），该评估将计算产品的具体环境影响，例如二氧化碳排放量。



谨记

若这些文字很难消化，下面是简单版：“一份丰富的BOM可以催生自动化EPD。”请查阅第2章，了解更多关于EPD的信息。

考虑DPP的优势

在悲观者看来，数字产品护照（DPP）延伸了生产者的责任范围，拓展了强制生产者确保材料回收的义务。对乐观主义者来说，DPP能带来利润。对于您的下游服务体系，DPP可以巩固您与客户的售后关系。这样可以促进高利润服务、新商业模式、循环回收价值和后续销售的忠诚度。对于上游工程项目，供应商的DPP可以提供丰富的关联组件和材料数据，用于指导选择并为您的BOM输入数据。



谨记

对于您的产品数据支持系统，这些护照可提供扩展您的资产记录系统的强制驱动因素。关联服务生命周期管理（SLM）和PLM有助于数据驱动的设计和了解配置的一线决策支持。请在第5章中查阅这些数据关联机制的详细信息。

现在就采取行动，开展能让CFO开心的环境足迹减少工作

开展能够推动利润增长的环境足迹减少工作，抢占市场先机。您应该为了可持续性目标之外的原因开展这些活动。它们对商业和环境都有好处。打动首席财务官（CFO）的最直接方式是降低成本。从您的产品和服务中去除不必要的材料和能耗通常会节省成本。减少足迹的其他业务价值手段包括对绿色溢价进行客户细分、合规性和供应链风险缓解，以及利用区域补贴。



技术资料

分析师和顾问一致认为，如今您可以通过在财务上有益的技术减少一半甚至更多的环境足迹。21世纪20年代可盈利的可持续性项目会让您赢得市场赞誉，而创新模式将在21世纪30年代实现规模化，为您未来的胜利奠定基础。我在第3章中详细讨论过这一点。

考虑在对品牌至关重要的主题上发挥引领作用

在可持续性方面，成为先行者的成本可能比等待采用已商业化方法的成本更高。但作为先行者也可以在与品牌高度契合的情况下建立优势。

应该大胆时就要大胆行动，但要做好关于这些可持续性措施的功课。您可以从许多公开的基准细节中获得灵感。例如，纪录片《Beyond Zero》讲述的是英特飞（Interface）模块地毯的故事，是一个很好的案例研究（在这里了解更多信息：beyondzerofilm.com）。阅读可持续发展报告，了解巴塔哥尼亚、施耐德电气、宜家 and 维斯塔斯等其他品牌领导者如何协调使其业务与可持续发展目标保持一致。

创新领域很广泛，但可能包括

- » 为“绿色溢价”客户群体提供尖端材料和能源采购
- » 使用增材制造实现轻量化和/或维修备件韧性
- » 具有租赁/可升级商业项目的多代循环平台

获得碳价值直觉

要想脱碳，您需要知道自己拥有的最佳机会。这些机会的核心是，人类需要让岩石圈中的碳始终留在深层岩石圈中（在释放出一些碳时，我们要把等量的碳送回岩石圈）。在离散制造中，这意味着要在全生命周期价值链中减少化石能源的使用。

如果从长远来看（2050年以后），您仍然需要燃烧一些化石燃料怎么办？您可以燃烧化石燃料，但也要通过建模了解未来通过直接空气捕获（DAC）或其他方法将同等数量的碳注入回岩石圈的成本（请查阅第2章，了解有关碳循环的详细信息）。

表6-1是一个简单图表，可以帮助您了解减少化石燃料的当前和未来价值（切记，您的公司是根据未来盈利潜力进行估值的）。表6-1对比分析了驾驶燃油车、使用化石能源发电作为充电源的电动汽车和使用太阳能作为充电源的电动汽车的情况。

表6-1 在美国驾驶4000公里（~2500英里）的对比

汽车选择	能源成本	Kg CO ₂ e	DAC成本
燃油车	300美元	1,000	100美元
通过电网充电的电动汽车	140美元	500	50美元
通过家庭太阳能充电的电动汽车	几乎为0	几乎为0	几乎为0

此表显示了驾驶员如今面临的能源成本和汽车的排放量，以及通过直接空气捕获将二氧化碳重新封存至岩石圈的未来净零排放责任成本，预计2050年每吨二氧化碳当量（MTCO₂e）成本为100美元。您可以在采矿、材料加工、运输、制造、运营、服务、发电和其他潜在的化石燃料燃烧活动的生命周期直觉中更广泛地运用这一认知。

获得循环直觉



警告

应用循环原则，尽可能地避免通过重复能源密集型活动来交付产品：

- » **好：**回收利用可以避免开采。
- » **更好：**再制造可以避免材料加工和开采。
- » **最好：**重复使用或维修可以避免上述所有。

但请记住，减少环境足迹只是需求的一半。另一半是让循环能够实现盈利：

- » **好：**材料选择与前瞻性可拆卸设计可提升回收规模效益。
- » **更好：**模块化可以为再制造零件创造供需关系。
- » **最好：**产品服务系统可以提高使用、服务和回收效率，并对利润做出直接贡献。

循环是有明确目标的商业结果。它不仅可以提供一流的盈利能力，还可以解决产品可持续性的所有三个足迹领域：

- » 有限材料保护（低浪费或无浪费）
- » 脱碳（再制造产品的碳效率比线性产品高60%至95%）
- » 有害物质控制（避免焚烧、水污染和垃圾填埋浸出）

使用可持续性要求建立数字主线

在理想情况下，模块化PLM BOM是您的配置记录系统，与作为您的实体设备记录系统的资产中心实现互联。其他参与系统均接入这两个中心。请查阅第5章了解更多有关生命周期数字主线的信息。

随着法规推动EPD和护照的普及，您需要快速建立这些核心基础设施。PLM BOM可以支持EPD自动化。资产中心可以充当护照。这一强大的产品数据支持系统能够推动可持续性以及大量其他价值，包括人工智能。但这个主题值得单独著书一本。希望您喜欢正在读的这本书！



信赖 PTC

ptc.com



我们的客户制造人们所依赖的产品，但他们也依赖 PTC 来支持其从设计、制造到服务和生命周期结束的整个产品生命周期。凭借在工业公司和流程方面的广泛专业知识及出色的技术，我们可以帮助您实现业务转型。

用更好、更环保的产品推动利润增长

揭开在提高利润的同时减少产品环境足迹的秘密。深入了解产品可持续性，更有适用于离散型制造商的实用技巧和专家洞见。无论您是经验丰富的专业人士还是这一领域的新手，本书都能为您提供耳目一新且易于理解的指导，对您产生积极的影响。了解产品可持续性的广度、重点关注领域，以及应在产品生命周期中采取的优先行动。准备好改造您的产品，在迈向更绿色的未来的进程中发挥引领作用！

本书精彩内容……

- 定义产品可持续性
- 了解合规需求
- 在保持盈利的同时减少产品环境足迹
- 探究可持续设计
- 运用全生命周期思维
- 向循环经济转型
- 产品服务差异化



戴夫·邓肯是 PTC 公司可持续发展负责人。他负责开发 PTC 产品组合的可持续性能力，帮助客户以更可持续的方式设计、制造和维护产品。戴夫也负责开展 PTC 的企业环境和社会影响项目。

Go to **Dummies.com**[™]
for videos, step-by-step photos,
how-to articles, or to shop!

ISBN: 978-1-394-36833-4
Not For Resale



for
dummies[®]
A Wiley Brand

WILEY END USER LICENSE AGREEMENT

Go to www.wiley.com/go/eula to access Wiley's ebook EULA.