

第1章

基于 MBD 的数字化设计制造一体化概述

1.1 从 MBD 到 MBE

当前，国内外大型装备制造企业的数字化技术发展迅速，三维数字化设计技术得到了广泛应用，基于模型的定义（Model Based Definition，MBD）的数字化设计与制造技术已经成为制造业信息化发展的趋势。

目前，大多数产品仍然采用数字化定义的方式，即“三维设计+二维生产”的混合模式进行设计和生产，这种二维+三维的定义模式，在设计和生产阶段不能做到单一数据来源，它们互为补充，从不同的方面描述产品。三维模型主要用来精确地描述产品的形状，而工程图用来表示对制造精度和质量要求、检验依据等。按照这种模式，设计人员除了建立三维模型外，还需要花大量时间和精力用于把三维模型转化为二维图样，提交制造厂使用，这样不仅增加了工作量，还难以保证数据的唯一性。在飞机等复杂产品的制造过程中，经常会出现工程更改，不能完全避免更改了二维或三维的一个，而忽略了另一个，造成数据之间的不协调，导致产品质量出现问题甚至报废。这种混合模式已经成为阻碍产品数字化技术应用进程的主要障碍之一。

基于模型的定义（Model Based Definition，MBD）改变了传统的产品定义模式。它以三维产品模型为核心，将产品设计信息、制造要求共同定义到该数字化模型中，通过对三维产品制造信息和非几何管理信息的定义，并将其作为产品设计与制造过程中的唯一依据，实现设计、工艺、制造、检测等的高度协作。

MBD 产品数据模型是对产品零部件信息完整描述的数据集，该数据集不仅包含了产品结构的几何形状信息，还包括原来定义在二维工程图中的尺寸、公差，一些必要的工艺信息及关于产品定义模型的说明等非几何信息，从而使 MBD 模型可以作为加工、检验的依据。对 MBD 信息内容的说明分为 MBD 装配模型与 MBD 零件模型两部分。MBD 零件模型信息可总结为三类：(1) 零件模型几何信息；(2) 零件属性信息；(3) 零件标注信息。零件模型几何信息描述了产品形状、尺寸信息；属性信息表达了产品的原材料规范、分析数据、测试需求等产品辅助信息；而标注信息包含了产品尺寸与公差范围、制造工艺和精度要求等生产必须的工艺约束条件。MBD 装配模型则由一系列 MBD 零件模型组成的装配零件列表加上以文字符号方式表达的标注和属性数据组成。因此三维数模 MBD 数据集涵盖后续加工、装配、检测等环节的所有几何信息与非几何信息。其包含的内容应由以下元素构成：相关设计基准数据、实体模型、毛坯、零件坐标系统、三维标注、工程注释、材料信息、标注集、其他定义数据。其内容构成如图 1.1.1 所示。

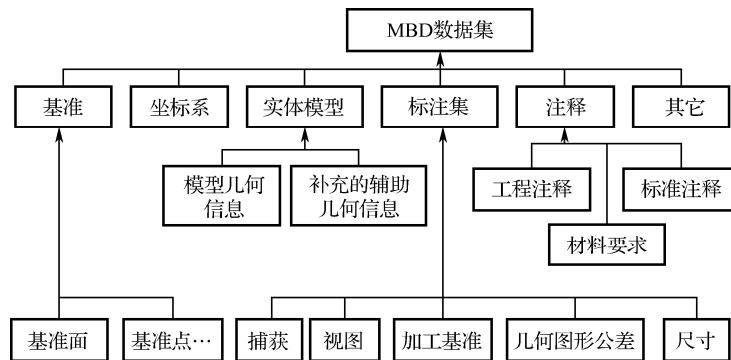


图 1.1.1 MBD 数据集内容

目前，国内外很多企业在 MBD 技术应用方面已经成熟，如波音公司在波音 787 客机研制过程中全面采用了 MBD 技术，将三维产品制造信息与三维设计信息共同定义到产品的三维模型中，摒弃二维图，将 MBD 模型作为制造的唯一依据，开创了飞机数字化设计制造的崭新模式。

为了更好地使 MBD 数据在产品的整个生命周期内能够被有效充分利用，很多大型企业开始研究、验证和应用基于模型的企业（Model Based Enterprise, MBE）的方法。MBE 就是要基于 MBD 在整个企业和供应链范围内建立一个集成和协同化的环境，各业务环节充分利用已有的 MBD 单一数据源开展工作，使产品信息在整个企业内共享，快捷、无缝和低成本地完成产品从概念设计到废弃的部署，有效缩短整个产品的研制周期，改善生产现场工作环境，提高产品质量和生产效率。

基于模型的企业（MBE）已成为当代先进制造技术的具体体现，代表了数字化制造的未来。美国陆军研究院指出：“如果恰当地构建企业 MBE 的能力体系，能够减少 50%~70% 的非重复成本，能够缩短达 50% 的上市时间”。基于此，美国国防部办公厅明确指出，将在其所有供应链中推行 MBE 体系，开展 MBE 的能力等级认证。全世界众多装备制造企业也逐步加入到 MBE 企业能力建设的大军中。由此可见，MBE 已不再单纯是一项新技术、新方法的应用和推广，而是上升到了国家战略和未来先进制造技术的高度，它的研究应用成功与否将关系到未来制造业的新格局。MBE 发展历程如图 1.1.2 所示。

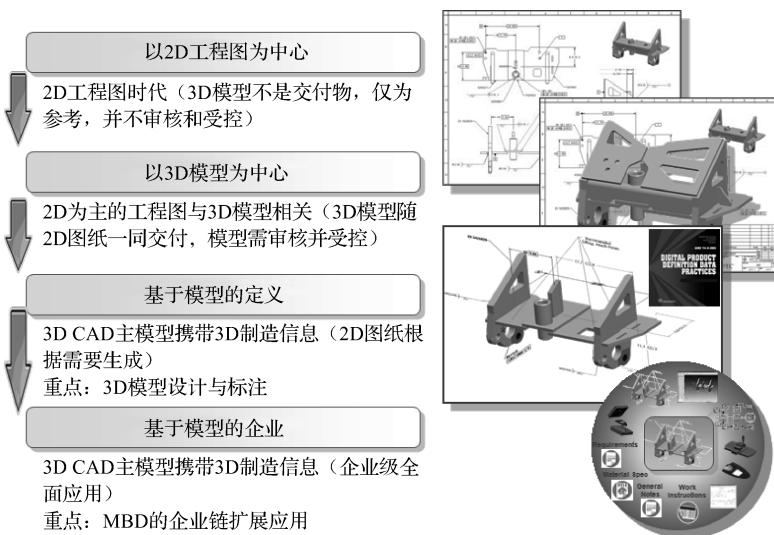
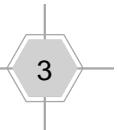


图 1.1.2 MBE 发展历程



作为一种数字化制造的实体，基于模型的企业（MBE）在统一的基于模型的系统工程（MBSE）指导下，通过创建贯穿企业产品整个生命周期的产品模型、流程管理模型、企业（或协作企业间的）产品管理标准规范与决策模型，并在此基础上开展与之相对应的基于模型的工程（MBe）、基于模型的制造（MBm）和基于模型的维护（MBs）的实施部署。

基于模型的工程、基于模型的制造和基于模型的维护作为单一数据源的数字化企业系统模型中的三个主要组成部分，涵盖了从产品设计、制造到服务的完整的产品全生命周期业务，以 MBD 主模型为核心在企业各业务环节顺畅流通和直接使用，从虚拟的工程设计到现实的制造工厂直至产品的上市流通，基于 MBD 的产品模型始终服务于产品生命周期的每个阶段。MBE 企业的能力在强调 MBD 模型数据、技术数据包、更改与配置管理、企业内外的制造数据交互、质量需求规划与检测数据、扩展企业的协同与数据交换六个方面的同时，更加强调扩展企业跨供应链的产品全生命周期的 MBD 业务模型和相关数据在企业内外的顺畅流通和直接重用。

构建完整的企业 MBE 能力体系是企业的一项长期战略，在充分评估企业能力条件的基础上统一行动，以 MBD 模型为统一的“工程语言”，在基于模型的系统工程方法论指导下，全面梳理企业内外、产品全生命周期业务流程、标准规范，采用先进的信息技术，形成一套崭新的、完整的产品研制能力体系。

MBE 的效益在 MBD 创建并在整个企业应用时就已经开始了，对于大型装备的原始制造商和供应商来说，在整个 MBE 企业的方案、设计、验证、制造、维护的各个环节都会带来如下实实在在的效益：

- 缩短新订/经修订的产品的交付时间，并降低了工程设计的返工周期；
- 整合并精简设计和制造流程，降低成本；
- 生产规划时间减少，减少生产延误的风险；
- 提高生产过程的设计质量，减少制造交货时间；
- 减少工程变更，减少产品缺陷，提高产品质量；
- 改善与利益相关者的合作、协同，缩减在产品的开发管理生命周期中的所有要素的周期和整体项目的成本；
- 提高备件的采购效率；
- 改进作业指导书和技术出版物的质量；
- 在维修过程中提供互动的能力。

1.2 基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案

1.2.1 PTC 基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案

美国 PTC（Parametric Technology Corporation，参数技术公司）于 1985 年成立，自 1989 年上市开始，就引起机械 CAD/CAE/CAM 界的极大震动。目前已成为 CAD/CAE/CAM/PLM/物联网等领域最具代表性的软件之一。

PTC 提供一套完整的基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案，帮助企业形成完备的 MBE 能力体系，减少繁重的集成与数据转换工作，能实现最大限度的数据畅通与可直接重用。PTC 形成了以 Windchill ProjectLink 为项目管理，以 Creo 为 MBD 定义工具，通过 Windchill

MPMLink 直接使用 MBD 模型进行工艺设计，采用 SLM Solutions 进行售后服务管理，以 Windchill PDMLink 为数据管理平台的基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案。PTC 基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案的六大核心技术包含全三维标注技术、创新的一体化建模能力、全三维可视化技术、全三维工艺设计、一体化管理平台技术、全三维标准和规范经验，如图 1.2.1 所示。

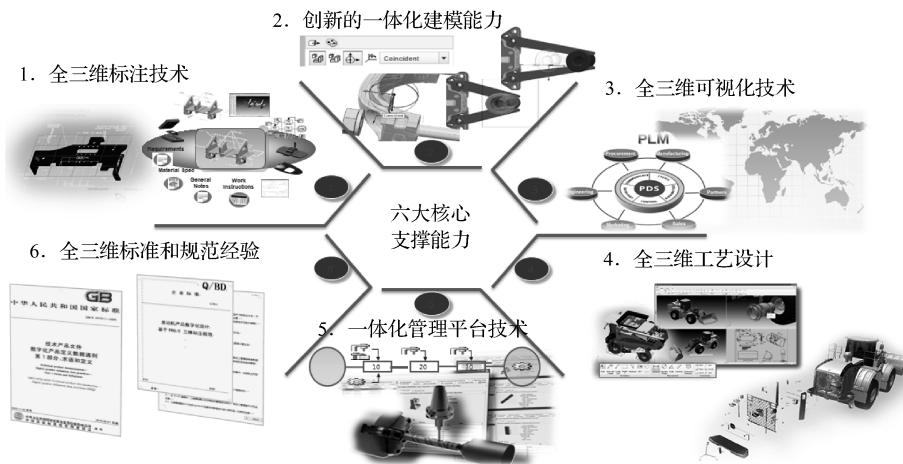


图 1.2.1 PTC 基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案的六大关键技术

PTC 基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案流程如图 1.2.2 所示。

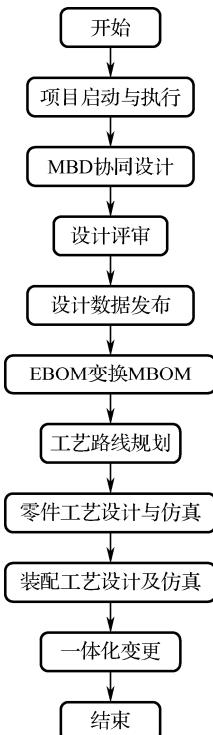


图 1.2.2 PTC 基于 MBD 的数字化设计制造一体化解决方案流程

1. 项目启动与执行

- 成立产品研制项目组，编制项目计划，如图 1.2.3 所示。
- 分配研制任务到相应人员，如图 1.2.4 所示。

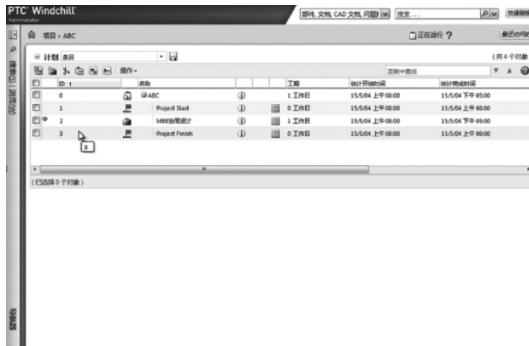


图 1.2.3 定义项目计划



图 1.2.4 执行项目任务

2. MBD 协同设计

(1) 在线和离线协作

- 协作规范：必备软件、环境配置。
- 定义协作接口：定义空间接口、遵循规范。
- 检查控制：中间节点控制、规范性检查。
- 数据接收与处理。
- 内部分析：空间检查、干涉检查。
- 完善设计：变更与优化。

(2) Top-Down 协同设计（见图 1.2.5）

- Top-Down 是一种协同设计方法。
 - ◆ 在设计顶层放置关键控制条件；
 - ◆ 通过产品结构逐级传递这些设计条件到设计底层。
- Top-Down 是一种协同管理工具。
 - ◆ 在一个核心位置集中管理所有的设计条件；
 - ◆ 贯穿整个设计过程，可以关联控制和传递设计变更；
 - ◆ 有效管理外部参考。

(3) MBD 设计与标注

- 单一主数据集，提供完整的产品定义。
 - ◆ 产品利用三维进行表达，包含产品生命周期内的所有信息，可以支持产品全生命周期全流程无障碍信息交流；
 - ◆ 可在企业级 PDS（Product Development System，产品开发系统）中管理，设计、工艺、制造、检验等部门都可以通过 PDS 获取相关信息。
- 以数字化模型为核心的研发模式优势。
 - ◆ 相比二维图，直接读图可更准确地理解产品；
 - ◆ 没必要在工程图中再次录入制造信息；



图 1.2.5 Top-Down 协同设计

- ◆ 消除设计与制造工艺的沟通鸿沟;
- ◆ 制造工艺提前介入;
- ◆ 在企业范围内很方便地访问最新的主模型。

3. 设计评审

设计评审是基于三维的 BOM 与模型可视化评审。MBD 过程如图 1.2.6 所示。

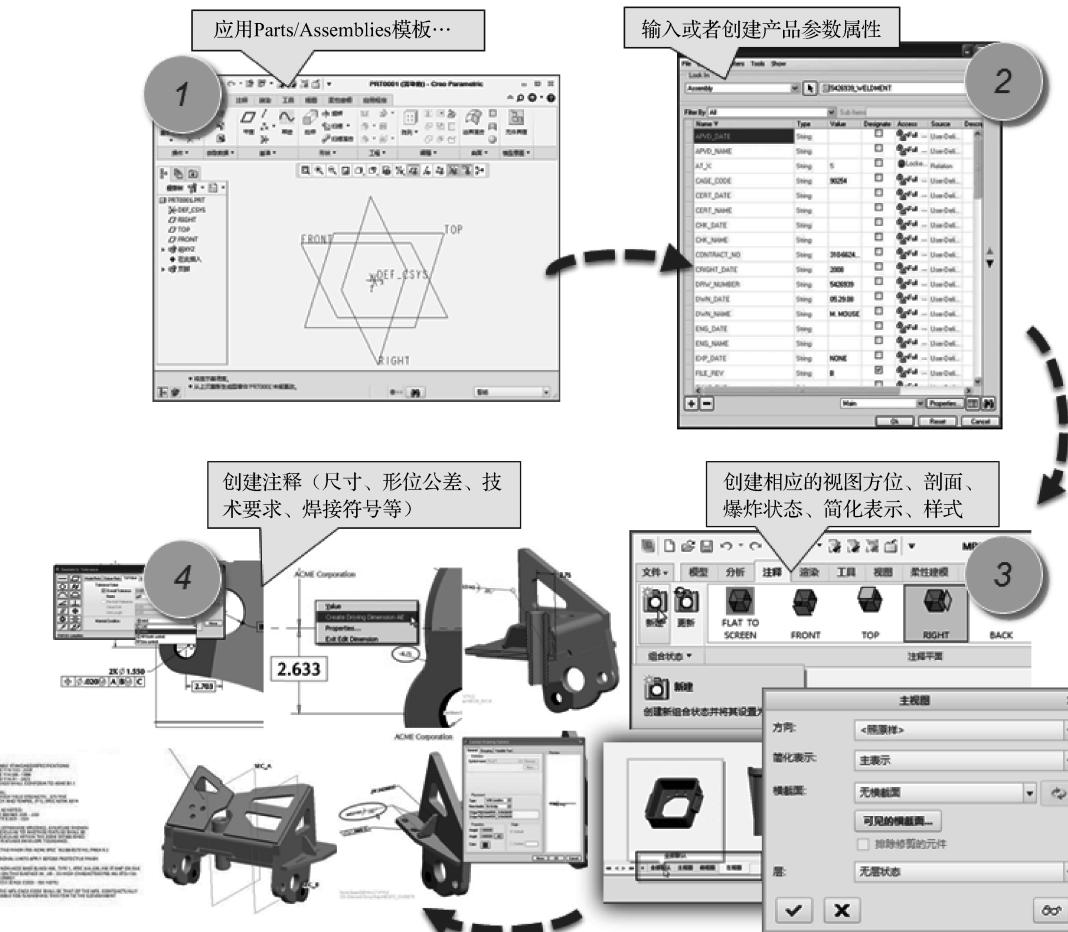


图 1.2.6 MBD 过程

- 设计师发起设计评审流程。
- ◆ 设计、校对、审查、工艺会签、标准化会签、审定、批准;
- ◆ 工艺会签可以进行二级签审的分派子流程;
- ◆ 流程结束后，系统自动签审电子签名到图纸标题栏;
- ◆ 批准后的数据受安全保密权限的严格控制。
- 实现产品全三维模型设计，并利用三维模型开展评审工作。
- ◆ 进行装配静态干涉检查;
- ◆ 进行机构运动模拟;
- ◆ 进行审核意见签署;
- ◆ 进行尺寸、空间距离分析;

- ◆ 进行人机工程分析；
- ◆ 进行拆装干涉分析；
- ◆ 对超大模型进行浏览分析；
- ◆ 非标注尺寸的评审。
- 设计评审环节中，嵌入工艺会签子流程。
 - ◆ 工艺接口人：负责工艺审查任务分发；
 - ◆ 各专业工艺：负责各自的工艺审查任务；
 - ◆ 工艺各专业全部完成预审任务后，工艺接口人将收到查看工艺预审意见任务；
 - ◆ 工艺接口人可以查看所有指派工艺专业反馈的工艺预审意见。

4. 设计数据发布

- 用户选择顶层零部件，在操作栏中新建“产品数据下发请求”。
- 在顶层 Part 的基础上可以自动收集本次要发放的产品结构，以及产品结构树上关联的三维/二维模型、辅助图样和技术文件。

5. eBOM 变换 mBOM（见图 1.2.7）



图 1.2.7 eBOM 变换 mBOM 过程

- 直接利用设计 BOM 编制制造 BOM。
- 支持对制造 BOM 的调整，可以调整装配结构、增加虚拟件、工艺组合件、去掉不必要的设计部件。
- 基于设计三维模型编制 mBOM。
- 设计 BOM 与制造 BOM 保持关联对应。
- 分析 BOM 之间的差异，保证数据完整性。

- 保证制造与设计数据的一致性。
- 提高制造 BOM 的编制效率。

6. 工艺路线规划

- 对 BOM 中的每个零部件规划工艺路线。
- 根据工艺流程，确定各分厂或车间流转路径。
- 可以根据工艺路线进行设计数据的授权。
- 基于 MBOM 可汇总出工艺路线表。
- 满足不同部门的业务需求。

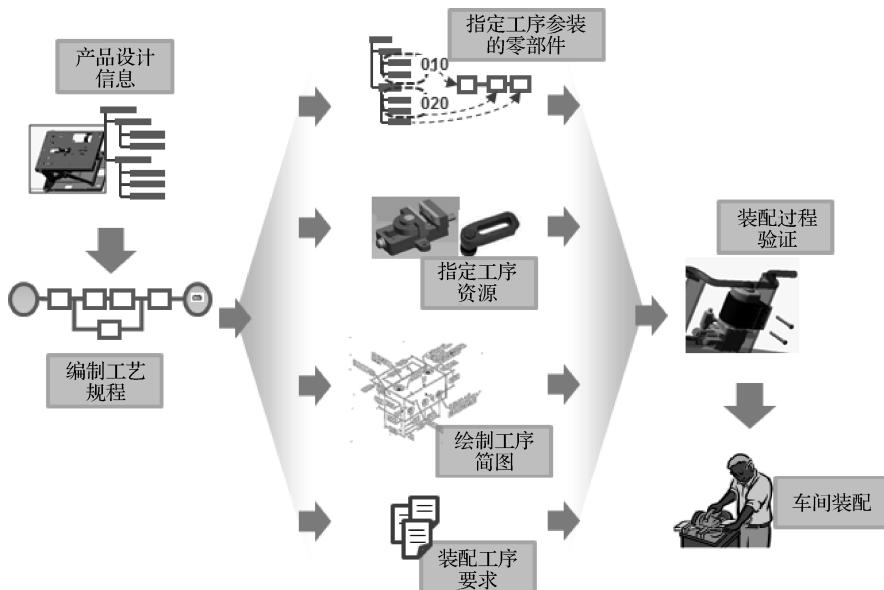
7. 零件工艺设计与仿真

- 普通机加工工艺设计。
 - ◆ 三维加工工艺设计：工序定义、所需资源定义与分配；
 - ◆ 继承设计模型，定义工艺模型（毛坯模型定义）；
 - ◆ 中间态工序模型定义。
- 工序模型设计。
 - ◆ 三维工艺设计；
 - ◆ 继承设计模型定义工艺毛坯模型；
 - ◆ 每个中间态工序模型定义；
 - ◆ 设计每道工序的工作内容、工艺资源、工艺图等；
 - ◆ 将工艺内容进行完整展示并输出为完整的工艺卡片。
- 数控机加工工艺设计。
 - ◆ 创建制造视图；
 - ◆ 创建工艺指导；
 - ◆ 工艺定义和典型工艺引用；
 - ◆ 导入数控信息；
 - ◆ 引用 3D 工序模型。
- 工艺模型的处理。
 - ◆ 继承设计模型；
 - ◆ 确认加工部位；
 - ◆ 确认加工尺寸；
 - ◆ 定义加工辅助。
- 数控仿真。
 - ◆ 轨迹仿真；
 - ◆ 快速过切检查；
 - ◆ 切削仿真；
 - ◆ 机床仿真。

8. 装配工艺设计与仿真（见图 1.2.8）

- 与研发部门查看同源信息。
- 工艺规程编制。

- 为工序制定参装零部件。
- 对工序内容进行填写。
- 装配工艺仿真，这是装配工艺验证的有效手段。
 - ◆ 装配运动仿真，以动画的方式展示装配过程；
 - ◆ 装配过程验证检查；
 - ◆ 车间装配指导。
- 工艺规程发布。设计与展示分离，可生成各种格式的工艺规程。



9. 一体化设计变更

- 设计发生变更。
 - ◆ 增加、减少零部件；
 - ◆ 更改三维模型。
- 变更评审与发布，装配模型检入 Windchill 系统，BOM 自动更新。
- 工艺得到提醒。
 - ◆ 预订设计数据的变更事件通知功能；
 - ◆ 系统中的工艺数据过期的自动提醒。
- 工艺 BOM 相应变更，根据 eBOM 与 mBOM 的关联性进行更改。

1.2.2 Creo 简介

Creo（2010 年推出）是整合了 PTC 的三个软件——Pro/Engineer 的参数化技术、CoCreate 的直接建模技术和 ProductView 的三维可视化技术的新型 CAD 设计软件包，是 PTC 闪电计划推出的第一个产品。

Creo 在拉丁语中有创新的含义。Creo 的推出，是为了解决困扰制造企业在应用 CAD 软件中的四大难题。CAD 软件已经应用了几十年，三维软件也已经出现了二十多年，似乎技术与市场逐渐趋于成熟。但是，制造企业在 CAD 应用方面仍然面临着四大核心问题：

(1) 软件的易用性。CAD 软件虽然技术上已经逐渐成熟，但是软件的操作性还很复杂，宜人化程度有待提高。

(2) 互操作性。不同的设计软件造型方法各异，包括特征造型、直觉造型等，二维设计还在广泛应用。但这些软件相对独立，操作方式完全不同，对于客户来说，鱼和熊掌不可兼得。

(3) 数据转换。这个问题依然是困扰 CAD 软件应用的大问题。一些厂商试图通过图形文件的标准来锁定用户，因而导致用户有很高的数据转换成本。

(4) 配置需求。由于客户需求的差异，往往会造成由于复杂的配置，而大大延长产品交付的时间。

Creo 的推出，正是为了从根本上解决这些制造企业在 CAD 应用中面临的核心问题，从而真正将企业的创新能力发挥出来，帮助企业提升研发协作水平，让 CAD 应用真正提高效率，为企业创造价值。

从功能上说，Creo 软件横跨工业设计、实体建模、加工制造、仿真、渲染等多个领域，包含了较多的功能模块。使用统一的界面和数据格式，用户可轻松操作各模块，完成概念设计与渲染、零件设计、虚拟装配、功能模拟、生产制造等整个产品的制造过程。针对产品设计的不同阶段，可以将 Creo 软件分为概念与工业设计、机械设计、功能模拟、生产制造等几个方面，分别提供完整的产品设计解决方案。Creo 是一个 CAD 设计软件包，其中包含了多个应用程序，各应用程序的功能简介见表 1.2.1。

表 1.2.1 Creo 应用程序简介

应用 程 序	简 介
Creo Parametric	使用强大、自适应的 3D 参数化建模技术创建 3D 设计
Creo Simulate	仿真分析结构和热特性
Creo Direct	使用快速灵活的直接建模技术创建和编辑 3D 几何
Creo Sketch	轻松创建 2D 手绘草图
Creo Layout	轻松创建 2D 概念性工程设计方案
Creo View MCAD	可视化机械 CAD 信息以便加快设计审阅速度
Creo View ECAD	快速查看和分析 ECAD 信息
Creo Schematics	创建管道和电缆系统设计的 2D 布线图
Creo Illustrate	重复使用 3D CAD 数据生成丰富、交互式的 3D 技术插图

1.2.3 Windchill 简介

作为产品生命周期 PLM 完整解决方案的市场领导者，PTC Windchill 系统能够支持企业在单一的系统平台中处理整个产品生命周期中的主要业务过程，企业在研发管理项目建设的不同阶段，可以利用 Windchill 系统提供的各种模块进行组合，以满足企业当前规划的产品开发管理系统需求。而 Windchill 系统还能对企业的特定应用，提供专门的解决方案，以帮助企业尽快获得收益。

在设计过程管理方面，Windchill 系统提供了以产品结构（BOM）为核心，面向多专业的设计过程管理，并通过构建透明化项目管理系统，建立与研发主项目和子项目之间的关联关系，实现产品研发进度与协作过程的管理。

在工艺制造管理方面，Windchill 系统通过其自身提供的 MPMLink 模块，提供了基于 MBD

的三维工艺过程管理能力，实现了设计和工艺过程的高效协作，实现了一体化管理；同时通过与业界先进的 GE MES 系统进行整合，真正实现了设计、工艺、制造及执行过程的一体化管理。

在质量及可靠性管理方面，Windchill 系统提供了面向产品全生命周期的质量闭环管理解决方案，从质量计划、工程设计、试验验证、采购制造、运行维护到分析改进，形成闭环管理体系。

在设计工具集成能力方面，通过 Windchill 系统与设计工具独一无二的深度集成技术，自动提取零部件属性、BOM、各种关联关系，生成可视化信息，方便工程师设计信息的提交、审核、发布，同时方便评审工程师进行多版本的设计比较，从而支持各种协同设计，并行设计，以减少设计阶段的错位和后期更改，达到设计周期缩短的目的。

在与企业应用系统集成方面，通过功能强大的成熟模块 ESI 和 Info*Engine，实现 Windchill 系统与企业其他系统（如 ERP、MES、SRM、QMS 等）之间的有机集成，优化系统之间的业务流程及信息的无缝交换。

更为重要的是，对于最新发布的 Windchill 11 版本，通过与 ThingWorx 技术平台解决方案的整合，使得 Windchill 系统成为业界第一个与物联网平台整合的、智能化的 PLM 系统。PTC Windchill 11 具有以下优点：

（1）智能。如今的产品研发是一个节奏快、极易发生变化的过程，涉及的人员和学科也比以往任何时候都多。若要做出准确的决策、提供高质量的工作成果和及时发布产品，必须让所有人都保持信息畅通，并从有关产品数据和流程的单一数据来源接收信息。

- 基于角色的应用程序：通过摒弃复杂的用户界面和大量的培训，更快、更轻松地为更多利益相干方提供与其工作相关的适当产品数据，从而充分发挥 PLM 的作用。
- 全新搜索功能：多层面的搜索功能使查找和重用零件变得更加快速、直观和简单。
- 经过改进的知识产权保护：增强的安全功能使其在与全球的内部人员和第三方协作人员进行协作时，保持数据和项目的安全性，从而为“随处设计，随处构建”的策略提供坚实的后盾。
- OSLC 标准：PTC Windchill 11 是一个智能开放的 PLM 系统。PTC 采用 OSLC 标准来改善协作以及与其他系统的连接。

（2）连通。智能互联产品为产品开发团队带来了新的挑战，同时也带来了新的机会，其中的一项便是他们能够直接获取实时运行数据，从而更快地改善产品质量。

- 互联的质量：捕获和分析现场数据以更快地检测故障，并利用更完整的信息来改进根本原因分析和纠正/预防措施。
- 需求追踪能力：利用 PTC Windchill 和 PTC Integrity 之间的最新联系，定义和管理系统级需求和产品设计之间的联系。
- Performance Advisor：PTC Windchill 11 是一款智能互联产品，可提供更好、更主动的支持，包括收集有关自身性能的信息、提醒 PTC 留意相关问题，以及保持匿名性和合规性。

（3）完整。当今的产品开发复杂性要求 PLM 以更敏捷的方法管理更多数据和流程：实现以零件为中心的设计、缩短产品上市时间、简化协作以及提高决策制定的准确性和速度。

- 经过改进的 BOM 转换：利用 eBOM、mBOM 和 sBOM 之间的平滑转换、可视化的并排 BOM 比较以及可在 BOM 中自动传递的更改，可以改善团队之间的协作。
- 经过更新的 BOM 管理：通过改进可视化、零件定义和变型管理来创建和管理以零件为中心的完整 BOM。
- 管理 PTC Creo 3.0 的突破性进展：利用最新的设计探索功能和 Unite 技术，以原生格式

管理任何受支持的 CAD 文件。

- 其他功能：改善了项目协作、PTC Creo View 中的可视化、客户体验管理等。

(4) 灵活。通过利用新的部署方式，即云、本地和完全托管的 SAAS 模型来降低 PLM 项目的投资规模，同时可保证可访问性和安全性。这种新的方式可通过订阅模式定价的形式来确保 PLM 项目或计划发生需求变化时灵活调整预算。

1.3 无碳小车设计简介

1.3.1 全国大学生工程训练综合能力竞赛介绍

贯穿本书的项目，选自第四届全国大学生工程训练综合能力竞赛命题。该命题为“以重力势能驱动的具有方向控制功能的自行小车”。给定某一确定的重力势能，根据能量转换原理，设计一种可将该重力势能转换为机械能，用来驱动小车行走的装置。该小车在前行时，能够自动避开赛道上按规则设置的障碍物。

该给定重力势能为 $4J$ （取 $g=10m/s^2$ ），竞赛时由统一提供的质量为 $1kg$ 的标准砝码（ $\Phi 50\times 65mm$ ，碳钢制作）垂直下降获得，砝码的可下降高度为 $400\pm 2mm$ 。标准砝码始终由小车承载，不允许从小车上掉落。图 1.3.1 为小车示意图。

要求小车在行走过程中完成所有动作所需的能量均由此给定重力势能转换而得，禁止使用任何其他来源的能量。因此该小车也简称为“无碳小车”。

要求小车具有可调节的转向控制机构，以适应设置有不同间距障碍物的竞赛场地。要求小车为三轮结构。具体设计、材料选用及加工制作均由参赛学生自主完成。

竞赛设“S”形与“8”字形两种赛道，由现场公开抽签在 $700\sim 1300mm$ 范围内产生一个“S”形赛道障碍物间距值，或在 $300\sim 500mm$ 范围内产生一个“8”字形赛道障碍物间距值。本书将以“8”字形赛道无碳小车的设计项目为例进行写作。

“8”字形赛道竞赛规则为：小车在半张标准乒乓球台（长 $1525mm$ 、宽 $1370mm$ ）上，绕两个障碍物按“8”字形轨迹运行。障碍物为相距一定距离放置在半张标准乒乓球台中线上的 2 个直径 $20mm$ 、长 $200mm$ 的圆棒，乒乓球台及障碍物设置示意图如图 1.3.2 所示。

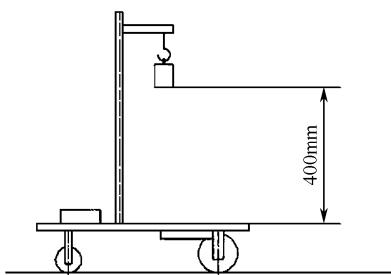


图 1.3.1 无碳小车示意图

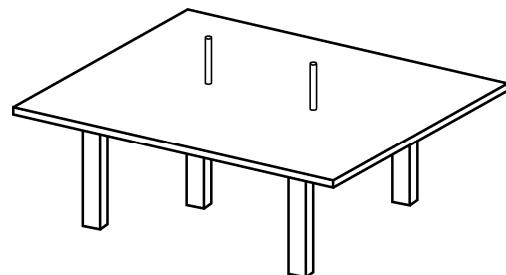


图 1.3.2 乒乓球台及障碍物设置示意图

一个成功的“8”字绕障轨迹判定规则为：两个包含障碍物的封闭图形轨迹和轨迹的两次变向交替出现，变向指的是轨迹的曲率中心从轨迹的一侧变化到另一侧。

比赛中，小车需连续运行，直至停止。小车没有绕过障碍、碰倒障碍、将障碍物推出定位圆区域、砝码脱离小车、小车停止或小车掉下球台均视为本次比赛结束。

1.3.2 无碳小车设计方案

绕“8”字无碳小车的设计包含方案设计、结构设计、零件制造、装配和调试等阶段。

1. 方案设计

小车的方案设计主要是从原理上确定小车的机构类型、传动过程等方案，并综合考虑小车尺寸、传动及定位的要求。

1) 传动比

小车的设计主要有两个传动比需要确定，一个是小车的绕线轴到小车驱动轮间的传动比，还有一个就是小车后轮到前轮的传动比。根据计算小车的绕线轴到小车驱动轮间的传动比取值6，小车后轮到前轮的传动比应满足从2.52~3.60的调节。

2) 转向调节方案

由于小车空间结构的限制，设计小车转向调节装置时，不考虑需要长曲柄才能满足最大偏转角要求的平面曲柄滑块机构，采用较为节省空间的空间四连杆机构。与曲柄滑块转向装置的原理类似，改变空间连杆的长度就可以改变前轮的偏转角，满足传动要求。

3) 传动方案设计

考虑到小车要持续绕障行走，小车的轨迹不能有太大的变化。设计小车的传动方案时，应优先选择齿轮传动。采用两级齿轮传动，选定第一组传动比为3，第二组传动比为2。两级齿轮传动示意图如图1.3.3所示。

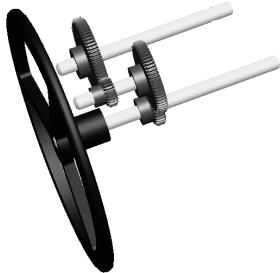


图 1.3.3 两级齿轮传动

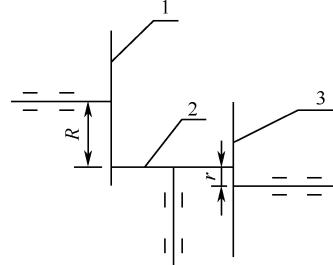


图 1.3.4 两个摩擦盘和一个摩擦轮传动示意图

从后轮到前轮的传动机构中要有一个传动比调节装置，采用较为简单的摩擦盘作为变速器。采用如图1.3.4所示两个摩擦盘和一个摩擦轮的传动机构，摩擦轮机构如图1.3.5所示。为保证摩擦轮的上下位置固定，设计了如图1.3.6所示的螺纹锁紧装置，确保摩擦轮不会上下窜动。

摩擦盘2带动控制前轮转向的空间四连杆机构，如图1.3.7所示。空间连杆机构使用关节轴承相互连接。小车总体传动设计完成后，绘制的小车机构传动原理图如图1.3.8所示。

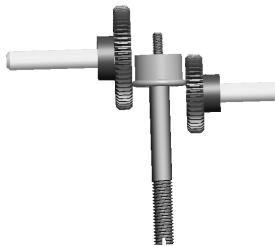


图 1.3.5 摩擦轮机构

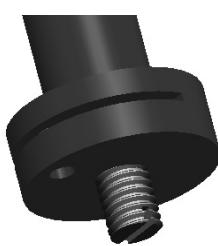


图 1.3.6 螺纹锁紧装置

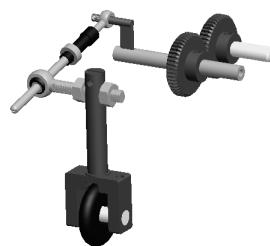
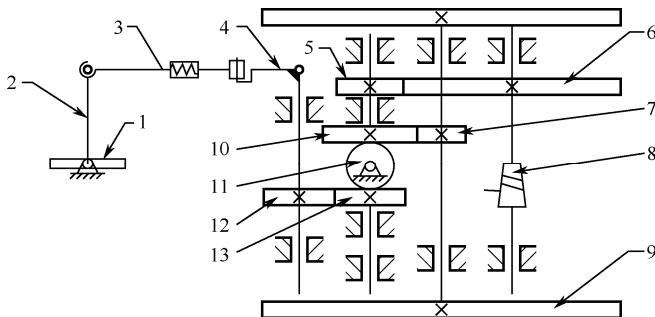


图 1.3.7 前轮四连杆机构



1—前轮；2—摇杆；3—长度调节微分头；4—曲柄；5—齿轮 1；6—齿轮 2；
7—齿轮 3；8—绕线套；9—后轮；10—齿轮 4；11—摩擦轮；12—齿轮 5；13—齿轮 6

图 1.3.8 小车机构传动原理图

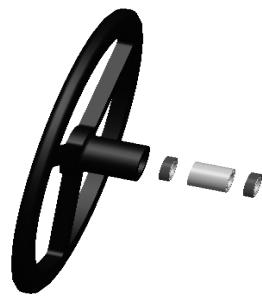


图 1.3.9 单向轴承实现差速的结构

小车由重物下落驱动绕线套所在的轴旋转，带动齿轮 2 转动，齿轮 2 与齿轮 1 喷合传动，传动比为 3；齿轮 1 与齿轮 4 同轴，齿轮 4 带动摩擦轮转动，摩擦轮带动齿轮 6 转动，齿轮 4 同时带动齿轮 3 转动，驱动后轮运动，从绕线套到后轮轴的传动比为 6；采用两个齿轮作为摩擦盘与可调的摩擦轮构成一个调速机构，以改变后轮到前轮的传动比。同时作为一个摩擦盘的齿轮 6 与齿轮 5 喷合传动，带动曲柄转动，通过空间四连杆，带动前轮周期性转向。

4) 差动方案设计

小车在行走时反复转向，这就要求小车的两个后轮必须有差动设计，采用如图 1.3.9 所示的单向轴承差速结构。该方案只需要在后轮的轮毂中添加一个单向轴承，小车转弯时在前轮导向作用下，内侧后轮会以内侧圆心转向，同时外侧车轮也会沿前轮的方向转动，形成一个差速系统。

2. 结构设计

方案设计完成以后，还要从结构上实现众多要求。结构设计过程中应注意小车零件的空间排布，在完成方案设计所有要求的前提下，不能相互干涉，满足小车装配的要求，所有零件需要有定位，零件形状应满足零件加工要求等。在结构设计过程中，对方案进行了多次优化。小车结构设计装配图如图 1.3.10 所示，制造加工完成后的实物图片如图 1.3.11 与图 1.3.12 所示。

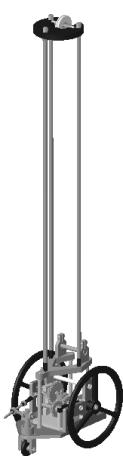


图 1.3.10 无碳小车模型装配图



图 1.3.11 无碳小车实物图片 1

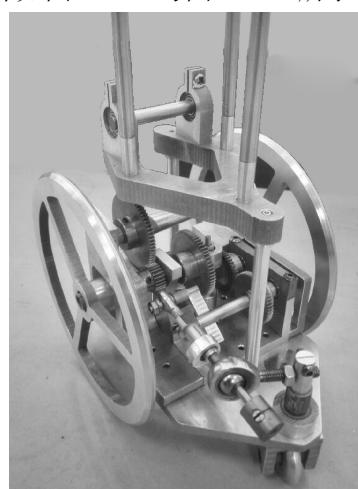


图 1.3.12 无碳小车实物图片 2