

基于 PDM 系统的汽车产品协同设计构建研究

赖云桥

(柳州五菱汽车新能源有限公司, 广西 柳州 545007)

摘 要: 阐述汽车产品协同设计工作平台 PDM 系统的服务器架构、技术标准及管理规范, 重点分析基于 PDM 系统的总布置工程、造型工程、截面工程、产品工程的协同设计流程及管理要求。

关键词: 汽车产品; PDM 系统; 协同设计; 工作平台

中图分类号: U469. 11; TP315 **文献标志码:** A **DOI:** 10. 15917/j. cnki. 1006-3331. 2025. 02. 007

Construction Research on Collaborative Design of Vehicle Products Based on PDM System

LAI Yunqiao

(Liuzhou Wuling New Energy Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: This paper elaborates on the server architecture, technical standards, and management rules of the PDM system collaborative design work platform for vehicle products. It focuses on analyzing the collaborative design of process and management requirements based on the PDM system of general layout engineering, modeling engineering, section engineering, and product engineering.

Key words: vehicle product; PDM system; collaborative design; work platform

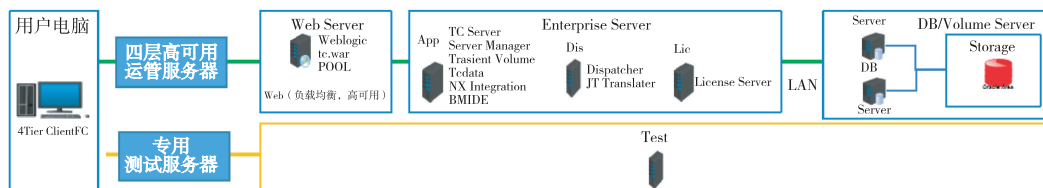
由于汽车由发动机/电驱动控制、底盘、车身、电气设备等复杂系统及部件组成^[1], 所以需要协同设计。而协同设计是一项贯穿市场需求工程、总布置工程、造型工程、截面工程、产品工程、工艺工程、制造工程、售后工程的综合性工作, 其确保汽车从概念到成品的整个设计过程能够达到预期的质量、性能、成本和时间目标^[2]。例如丰田汽车精益产品开发^[3] 和华为公司集成产品开发^[4], 均强调协同设计工程, 并追求这方面的最优解, 以实现管理和产品在行业领先。本文在确定市场需求的前提下, 基于集成协同设计软件的产品数据管理 (product data managment, PDM) 系统, 开展汽车产品总布置工程、造型工程、截面工程、产品工程等方面的协同设计。

1 PDM 系统构建及管理

PDM 系统作为支撑产品协同设计工作的系统平台, 其服务器架构、技术标准的构建及管理应确保协同设计工作持续有效、数据/知识有效保存及再利用。

1.1 PDM 系统服务器架构及配置

PDM 系统的服务器包括两部分: 一是运行及管理产品研发与设计工作的运管服务器; 二是开展功能测试、性能测试等各类测试及验证工作的测试服务器。PDM 系统正式服务器应根据研发部门的用户并发访问、平台算力、数据增长、数据存储及备份、数据安全等要求构建^[5], 并定期进行运行维护及性能诊断。服务器的架构及配置如图 1 所示。



(a) 服务器架构

收稿日期: 2024-10-18。

第一作者: 赖云桥 (1983—), 女, 工程师, 主要从事汽车产品数据管理研究工作。E-mail: laiyunqiao@wuling.com.cn。

服务器资源		数量	用途	内存	中央处理器CPU	磁盘整列	内置硬盘	功能/用途说明
运维服务器	DB	2台	数据库服务/卷服务	128G	4C每C12核 2.4G以上	RAID5	4*600G	数据安全、平台算力
	App	1台	APP服务器	128G	2C每C12核 2.4G以上	RAID1	2*600G	平台算力、数据交换
	App	1台	Web服务器	128G	4C每C12核 2.4G以上	RAID1	2*600G	并发访问、高可用
	Dis	1台	IT转换及可视化服务器	128G	2C每C12核 2.4G以上	RAID1	2*600G	数据（JT）转换
	Lic	1台	许可服务器	16G	2C每C8核 2.0G以上	RAID1	2*600G	许可应用/调用
	\	1组	高可用存储	64G	\	\	12T	数据存储、数据增长
测试服务器	Test	1台	测试服务器	64G	2C每C8核 2.0G以上	RAID1	2*600G	系统、功能测试专用

(b) 服务器配置

图 1 PDM 服务器架构及配置

1.2 PDM 系统技术标准及管理

PDM 系统作为研发部门的产品协同设计平台，需建立以下技术标准^[6]：①PDM 系统的数据分类及属性规则；②PDM 系统的组织、角色、数据权限规则

及管理要求；③PDM 系统数据备份及系统运维规则。

通过上述技术标准对 PDM 系统的分类进行定义、设置、管理，确保 PDM 系统产品协同设计相关数据有效、安全及使用受控。PDM 数据分类及定义见表 1。

表 1 PDM 数据分类及定义

类别	分类名称	分类内容描述	类型	结构或关系树
产品谱系	产品型谱	产品型谱	文件夹	/
	平台	平台代号	文件夹	产品型谱→平台代号
	产品代号	产品代号	文件夹	产品型谱→平台代号→产品代号
	车辆型号	车辆型号	文件夹	产品型谱→平台代号→产品代号→车辆型号
	车型细分	车型配置	文件夹	产品型谱→平台代号→产品代号→车辆型号→车型细分
整车结构	整车结构树（VAS）模型	VAS 及 3D	零组件	产品代号→VAS
	总布置模型	总布置模型及 3D	零组件	产品代号→VAS→总布置模型
	造型模型	造型模型及 3D	零组件	产品代号→VAS→造型模型
	主模块模型	主模块模型及 3D	零组件	产品代号→VAS→主模型
	截面模型	截面模型及 3D	零组件	产品代号→VAS→截面模型
	研究模型	研究模型及 3D	零组件	产品代号→VAS→研究模型
	主模型分组	主模型一、二层及 3D	零组件	产品代号→VAS→主模块模型→主模型分组
	虚拟分组	总布置/造型/截面/研究模型一、二、三层及 3D	零组件	产品代号→VAS→总布置、造型、截面、研究模型→虚拟分组
零部件	装配组件（IA）	IA 及 3D、2D	零组件	主模型分组→IA
	零部件	正式零件及 3D、2D	零组件	主模型分组→IA→零部件
	临时零件	研究模型零件	零组件	虚拟分组→临时零件
	临时零件	临时零件及 3D	零组件	/
	总布置零件	总布置零件及 3D、2D	零组件	虚拟分组→总布置零件
	造型零件	造型零件及 3D、2D	零组件	虚拟分组→造型零件
	截面零件	截面零件及 3D、2D	零组件	虚拟分组→截面零件

2 第三方设计软件的集成及管理

第三方设计软件是研发人员开展设计开发工作的工具，为确保产品协同设计的工作效率以及软件间的互译调用能力，应对第三方设计软件与 PDM 系统的集成使用进行全面评估，并构建相应的集成标准规范。

2.1 第三方设计软件集成评估

第三方设计软件与 PDM 系统的集成，需满足产品建模与设计 BOM 相互翻译、数据模型轻量化生成及快速调用等需求。根据其 与 PDM 功能的配合及升级成本、建模模板及数据填写、数据转换及提取、轻量

化模型生成规则等需求开展评估及选用^[7]。第三方设计软件集成评估方式见表 2。

表 2 第三方设计软件集成评估方式

软件分类	软件版本	PDM 版本		PDM 版本 集成评估
		TC 11. 6	TC 13. 3	
CAD 软件	NX13300	兼容	不兼容	TC11. 6
CAD 软件	CAXA2016	兼容	兼容	TC11. 6/TC13. 3
造型软件	Alias2021	兼容	兼容	TC11. 6/TC13. 3
总布置软件	NX30113	兼容	兼容	TC11. 6/TC13. 3
CAE 软件	Hyperwork2016	兼容	兼容	TC11. 6/TC13. 3
Office 软件	WPS 2019	兼容	兼容	TC11. 6/TC13. 3

2.2 第三方设计软件集成标准

CAD 类设计软件支持复杂的三维建模,可帮助设计师创建精确且逼真的产品模型,有效地支持其开展产品协同设计。其与 PDM 系统集成需建立的技术标准如下:①CAD 建模规范;②CAD 工程制图规范;③焊点建模规范。

通过上述技术标准的定义、设置、约束,可实现 PDM 系统产品协同设计中相关的建模模板集成、模型创建管控、模型接口调用及模型质量检查约束^[8]等。基于 3D 数据模型的模型质量检查规则见表 3。

表 3 3D 模型质量检查规则

序号	检查项	检查内容描述	要求
1	检查零件单位	检查零件单位是否正确	强制项
2	建模公差	检查建模公差是否正确	强制项
3	草图是否全约束	检查草图是否全约束	警告项
4	多实体部件	检查模型中是否存在多个实体	警告项
5	对象-微小的	模型中是否存在微小对象	警告项
6	体-数据结构	检查模型中是否存在非法或无效的几何体	警告项
7	体-一致性	检查拓扑结构的连续性和一致性	警告项
8	面-锐刺/切口	检查模型中是否存在锐刺和小裂口	警告项
9	体-面-面相交	检查模型上是否存在一个面与另一个面相交	警告项
10	面-自相交	检查是否存在自相交的面	警告项
11	拟制特征状况检查	检查是否有特征处于抑制(SUPPRESSED)状态	强制项
13	非激活特征检查	检查是否有特征处于非激活(INACTIVE)状态	强制项
14	检查文件名	检查当前工作部件的文件名是否和制定的格式相匹配	强制项
15	验证工作坐标系(WCS)	检查工作坐标系(WCS)是否为绝对坐标系(ACS)	强制项
16	检查多个必需的类别	检查图层设置中是否包含用户要求的层类别	强制项
17	图层内容正确性检查	检查层类别中是否只包含用户要求的对象类型	强制项
18	检查类别/图层映射	检查层类别中是否包含用户指定的层范围	强制项
19	建模文件图层状态设置检查	检查层的状态是否与标准中设置的一致	强制项
20	引用集内容检查	检查引用集是否包含无效的对象类型	警告项
21	检查多个必需的引用集	检查文件中是否存在所有用户要求的引用集	强制项
22	建模文件属性检查	检查要求的属性是否存在,以及值是否为空	强制项

3 产品数据标准及管理

产品数据是产品协同设计的数据源,是不同部门和团队能够进行产品协同设计的基础,其技术标准、管理要求应确保所有相关人员能够准确、一致地使用数据,并进行协同设计^[9]。

3.1 产品数据技术标准

汽车产品总布置工程、造型工程、截面工程、产品工程协同设计涉及的零件、3D、2D、BOM 等产品数据,需在 PDM 系统进行产品全生命周期数据的标准化管理,以确保产品协同设计的数据源唯一、有效、完整、可追溯。产品数据技术标准规则见表 4。

表 4 产品数据技术标准规则

序号	规则名称	规则内容描述
1	PDM 零部件号、图号和数模号规则	定义 PDM 系统零件件号、数模号、图纸号编码规则
2	PDM 产品配置数据编码规则	定义 PDM 产品配置选项码编制规则
3	整车结构树结构及编码规则	定义 PDM 整车造型、总布置、截面、主模块、研究模型的结构及规则,汽车产品设计分组结构
4	UPC FNA 编码规则	定义 PDM 产品汽车零件的统一零部件分类、功能名称地址编码规则
5	PDM 数据创建及发布管理规定	定义 PDM 系统所有数据的创建、冻结、发布操作管理规则
6	产品配置表管理规定	定义 PDM 产品配置选项码与产品配置的约束及管理规则
7	技术文件管理规定	定义 PDM 所有数据发布流程及签批要求
8	工程更改管理规定	定义 PDM 系统变更工作流程及管理要求

3.2 产品数据管理要求

产品数据在 PDM 系统的设计及运行,应严格遵循 VAS 标准、建模规范、设计规范/标准开展,具体包括:①创建整车结构模型、开展系统/零部件模型设计;②开展系统/零部件设计检查/虚拟评审;③生成

3D 轻量化模型,支持整车虚拟评审、CAE 仿真、尺寸工程分析等应用。产品数据的有效设计及运行,能确保产品设计及发布质量,实现产品协同设计的低风险、高设计效率、快设计决策。PDM 系统的 3D 模型创建及设计检查管理如图 2 所示。

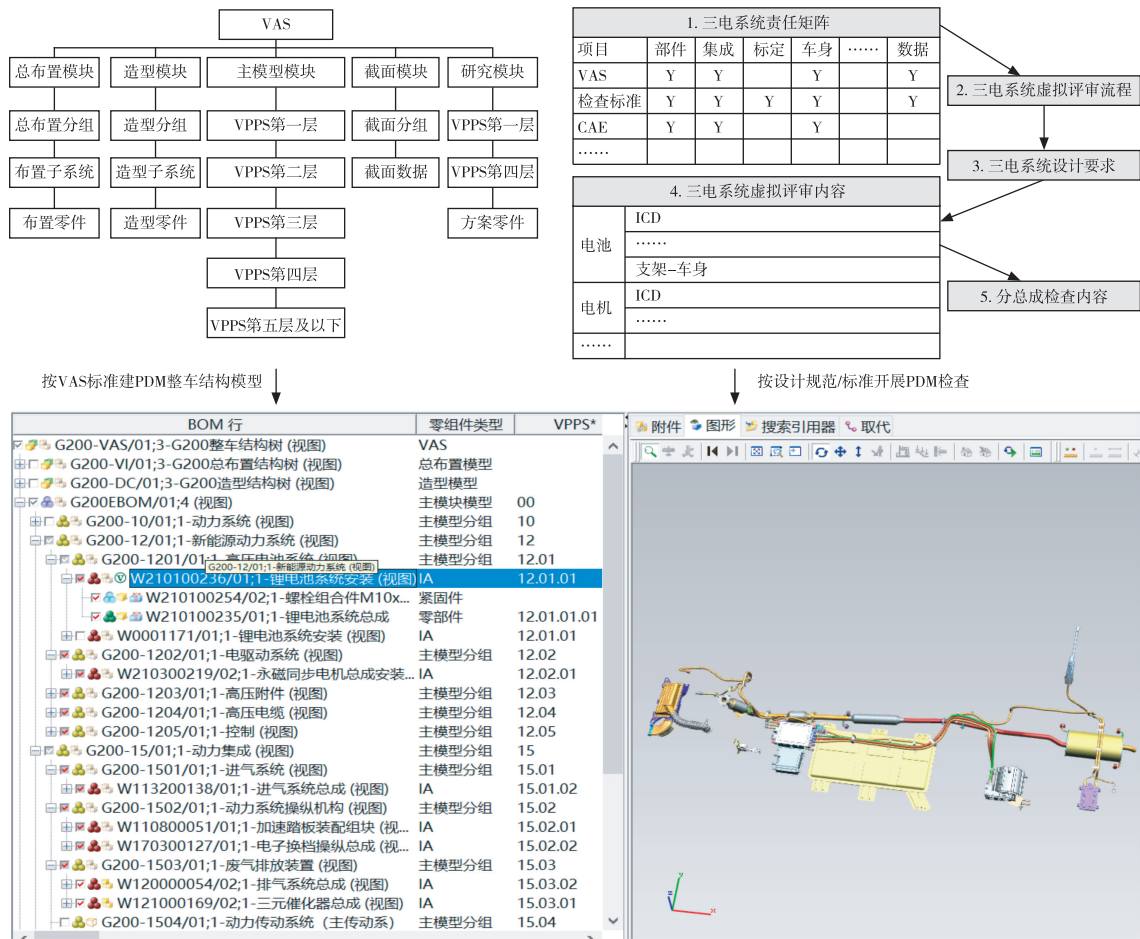


图 2 PDM 系统 3D 模型创建及设计检查管理

4 协同设计流程及内容

汽车产品开发中,协同设计能够整合各领域的专

业知识、融合各方的创意,实现各个部件和系统之间的无缝衔接与匹配,实时共享数据、设计方案,以便在

设计早期发现潜在问题和冲突。其流程的建立应确保产品协同设计能够打造更具创新性和竞争力的产品,提高产品的整体性能和可靠性,降低产品后期更改成本和风险、减少交付时间和重复工作,以便产品更快地推向市场。

4.1 协同设计流程建立

协同设计应建立好流程,以确保汽车产品开发涉及的总布置工程、造型工程、截面工程、产品工程等设计工作协同、有序开展。汽车产品协同设计工作流程如图 3 所示,流程步骤及内容见表 5。

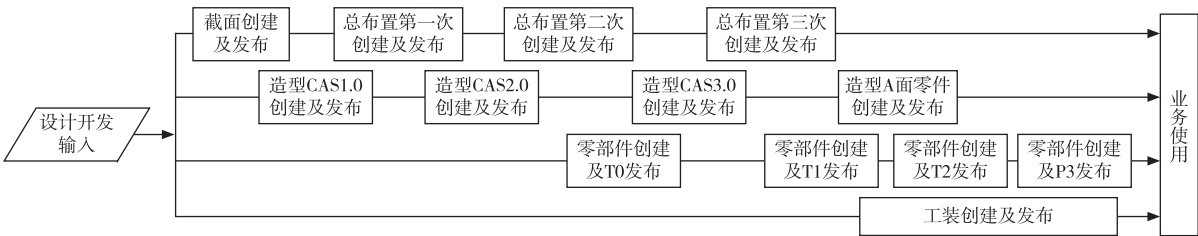


图 3 汽车产品协同设计工作流程图

表 5 汽车产品协同设计流程及内容

阶段	流程	工作内容及要求	交付物
设计开发输入		1) 总布置工程师根据新产品项目输入,开展总布置零件设计。 2) 造型工程师根据新产品项目输入,开展造型前期概念 A 面(CAS)设计。 3) 产品工程师根据新产品项目输入,开展截面、零部件产品零件设计。	/
项目启动 ↓ 项目批准	截面创建及发布	1) 项目启动时,总布置工程师按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“截面虚拟分组”下创建十大截面,凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。 2) 项目批准前,产品工程师依据造型 CAS1.0、总布置第一次数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“截面虚拟分组”下创建典型截面,走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、十大截面、典型截面
	造型 CAS1.0 创建及发布	造型工程师依据总布置硬点数据、十大截面数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“造型虚拟分组”下创建 CAS1.0,凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、CAS1.0
	总布置第一次创建及发布	总布置工程师依据造型 CAS1.0 数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“总布置虚拟分组”下创建总布置、车门、造型空间、底盘相关的布置模型,凭借签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、总布置模型
	造型 CAS2.0 创建及发布	造型工程师依据总布置第一次数据、典型截面数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“造型虚拟分组”下创建 CAS2.0,凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、CAS2.0
	总布置第二次创建及发布	总布置工程师依据造型 CAS2.0 数据、典型截面数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“总布置虚拟分组”下创建总布置、车门、造型空间相关的布置模型,凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、总布置模型
项目批准 ↓ 造型冻结	零部件创建及 T0 发布	1) 产品工程师依据 CAS 数据、总布置数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“IA”下创建零部件(含 3D/2D),凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM T0(手工样件 3D、U0 试制图)发布流程。100% T0 发布,一般在 CAS2.0、总布置第二次数据后。 2) 产品工程师按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“主模型分组/IA/零部件”下,创建初始产品焊点。 3) 产品工程师创建零部件数据时,需选择 UPC 及 FNA 唯一确认的标准化零件名称,赋予新增零件使用,当无法标准化名称时提出《零件中文名称库更改申请单》,数据工程师创建 PDM UPC 及 FNA。	《3D 数据设计审核表》、零部件、3D、U0 试制图、焊点、《零件中文名称库更改申请单》、UPC、FNA
	造型 CAS3.0 创建及发布	造型工程师依据总布置第二次数据、T0 数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM“造型虚拟分组”下创建 CAS3.0,凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、CAS3.0

表 5(续)

阶段	流程	工作内容及要求	交付物
造型冻结 ↓ 验证数据发布	总布置第三次创建及发布	总布置工程师依据造型 CAS3.0 数据、T0 数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM “总布置虚拟分组”下创建车门、造型空间相关的布置模型,凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、总布置模型
	零部件创建及 T1 发布	1) 产品工程师依据 CAS 数据、总布置数据等,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM “IA”下创建新版本零部件(含 3D/2D),凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM T1(软工装样件 3D、U1 试制图)发布流程。100% T1 发布,一般在 CAS3.0、总布置第三次数据后。 2) 产品工程师创建/完善产品焊点数据。	《3D 数据设计审核表》、零部件、3D、U1 试制图、焊点
	造型 A 面零件创建及发布	造型工程师依据总布置第三次数据、T1 数据,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM “造型虚拟分组”下创建 A 面(A 级曲面),凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM 发布流程。	《3D 数据设计审核表》、A 面
验证数据发布 ↓ 非可售车阶段	零部件创建及 T2 发布	1) 产品工程师依据 A 面数据等,按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM “IA”下创建新版本零部件(含 3D/2D),凭签批完成的《3D 数据设计审核表》走 PDM T2(工装样件 3D、U2 试制图、U2 形位公差 GD&T 图)发布流程。当 U2 试制图首次发布与 T2 3D 模型分开发布时,采用 T2 试制图发布流程进行。 2) 产品工程师走 PDM T2 发布流程前,需完成 IA 下级采购件的“是否并入过程件”识别,完成后发布 IA 级的设计物料清单(EBOM)。 3) 产品工程师走 PDM T2 流程,单独发布产品焊点。 4) 尺寸工程师选择需要创建 GD&T 图的零部件,其操作流程如下:①点击菜单“客制化开发”;②生成 GD&T 图;③创建零部件号+“GD&T”的数据,走 GD&T 图发布流程。	《3D 数据设计审核表》、零部件、3D、U2 试制图、U2 GD&T 图、焊点
	零部件创建及 P3 发布	1) 产品工程师按《PDM 产品数据分类及结构规则》,在 PDM “IA”下创建新版本零部件(含 3D/2D)。 2) 尺寸工程师升级现有发布版 GD&T 以维护新版 GD&T 图与零部件数据的关联关系。 3) P3(量产产品图、GD&T 图)数据,走 PDM ECN 发布流程。 4) P3 数据,原则上在工装样件认可(OTS 认可)后开始,并在 10 个工作日内完成发布和发放。	《3D 数据设计审核表》、量产产品图、量产 GD&T 图
	工装创建及发布	1) 工艺工程师完成工装(含 3D、2D)创建后走 PDM 发布流程。 2) 工艺工程师手动“复制”工装数据后“粘贴”到对应的零部件下,实现工装与零部件的关联。	工装、工装数模、工装图纸
	业务使用	1) 数据工程师通过 PDM “EBOM”刷写 EBOM 中物料的“使用车间信息”,再由 PDM-ERP(企业资源与计划系统)接口向 ERP 传递物料数据。 2) 其他部门根据 PDM 电子发放通知,按《PDM 数据使用管理规定》,查阅及使用 PDM 数据。	ERP 物料

4.2 协同设计管理要求

汽车产品的协同设计是一项严谨的系统工程,其相关的交付物应在企业新产品开发控制程序中被严

格定义,并在新产品项目开发中得到严格策划、实施及交付管控^[10]。数模交付定义见表 6,其中新产品项目 T2 的数据发布计划见表 7。

表 6 数模交付定义

数据状态	数据成熟度要求
T0	完成度为初等程度的零件数模(重要的坐标点,初步结构或尺寸,可用于对标分析等)和图纸(图纸阶段为 U0,即手工样件试制图)。
T1	完成度为中等程度的零件数模(主要的汽车坐标,主要结构已经确定,可用于采购招标、制造工程分析及软工装设计)和图纸(图纸阶段为 U1,即软工装样件试制图)。
T2	最终设计状态的数模(满足全部设计意图和要求且需具有精确的坐标尺寸,可用于供应商开模、制造工程工装模具设计)和图纸(图纸阶段为 U2,即正式工装样件试制图)。
P3	最终设计状态数模的行为公差图或产品工程图(图纸阶段为 R,即正式/量产图)。

表 7 表 6 中新产品项目 T2 的数据发布计划

零件件号	零件名称	产品科室	长周期	计划时间
F0000101	动力蓄电池	新能源部件科	是	2022. 5. 10
F0000110	驱动电机总成	新能源部件科	是	2022. 6. 20
F0000130	电机控制器总成	动力总成科	是	2022. 6. 20
F0000140	整车控制器总成	新能源标定科	是	2022. 5. 10
F0000150	左前悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000161	右前悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000163	左后悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000174	右后悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000190	六角头螺栓 M8×110	数据工程科	否	2022. 8. 10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

5 结束语

在数字化信息化的时代,追求效率、质量、成本的汽车产品开发,需要各个方面协同设计,而承载产品研发数据生命周期管理的 PDM 系统是协同设计有效开展及实现的平台工具。本文介绍的 PDM 系统服务器架构及配置、技术标准及管理,第三方设计软件的集成及管理,对基于 PDM 系统的汽车产品协同设计的构建和管理有一定的指导作用。

参考文献:

[1] 徐瑾. 汽车原理与构造[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2003:7-9.

[2] 刘永清. 汽车整车集成技术[M]. 北京:机械工业出版社,2023:8-10.

[3] 詹姆斯,杰弗里. 精益产品开发体系:丰田整合人员、流程与技术的 13 项精益原则[M]. 精益企业中国,译. 北京:人民邮电出版社,2017:56-81.

[4] 樊辉. 研发再造:IPD 变革管理六步法[M]. 北京:电子工业出版社,2024:149-161.

[5] 舒继武. 数据存储架构与技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2023:1-43.

[6] 华为公司数据管理部. 华为数据之道[M]. 北京:机械工业出版社,2020:35-71.

[7] 李少波,刘丹. PDM/PLM 及应用系统集成技术[M]. 北京:机械工业出版社,2024:231-236.

[8] 李迪菲. 论标准化与 PDM 系统在企业产品设计研发中的融合应用[J]. 中国标准化,2022(10):81-86.

[9] 夏忠毅. 从偶然到必然:华为研发投资与管理实践[M]. 北京:清华大学出版社,2019:183-208.

[10] 尹义法. 产品开发项目管理[M]. 北京:机械工业出版社,2022:25-130.

(上接第 5 页)

参考文献:

[1] 陶婷,罗蕊,徐永能. 基于 LabVIEW 的城轨列车轴温监测系统软件设计与实现[J]. 现代制造技术与装备,2017(10):4-6.

[2] 郑锐,付雷杰,刘振涛,等. 基于 LabVIEW 的多数据采集器自动监控软件设计与开发[J]. 计算机测量与控制,2017,25(6):107-111.

[3] 吴丹阳,魏元焜. 基于 LabVIEW 的目标跟踪系统软件设计[J]. 武汉职业技术学院学报,2023,22(3):114-120.

[4] 张迪,刘鑫. 基于 LabVIEW 软件的机器人避障控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2020,28(9):110-115.

[5] 陈贵宾,高振海,何磊. 车载三维激光雷达外参数的分步自动标定算法[J]. 中国激光,2017,44(10):243-249.

[6] 吴奋陟,郭绍刚,朱飞虎,等. 基于标定场的激光雷达两步标定方法[J]. 空间控制技术与应用,2017,43(4):57-62.

[7] 韩栋斌,徐友春,王任栋,等. 基于多对点云匹配的三维激光雷达外参数标定[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(2):449-456.

[8] 杨超,李天剑,胡欢,等. 基于非线性优化的激光雷达在线标定算法[J]. 计算机工程与设计,2021,42(7):1919-1925.

[9] 谢国涛,王帅杰,高铭,等. 基于运动约束的激光雷达与车体坐标系旋转参数标定[J]. 中国公路学报,2024,37(3):259-272.

[10] 龚子恺,席燕辉,沈大勇. 激光雷达外参数的自动标定[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(22):283-291.