

基于模型定义技术的发展及应用

——智能制造的关键技术

■ 北京航空航天大学 (100191) 范玉青

产品数字化定义 (Product Digital Definition, PDD)是工程技术人员对所设计产品的形状、尺寸、技术参数及其制造信息等的一种数字化描述,它经历了漫长的发展过程。目前,基于模型定义 (Model Based Definition, MBD)是产品数字化定义技术的最新发展,也是智能制造的关键技术。

1. 产品数字化定义的发展

随着计算机技术、数字控制技术以及数字化图形显示技术等软硬件的发展,以及在工程实际应用的需求牵引下,产品数字化定义技术中的几何造型技术经历由工程图样、线架模型、表面模型到实体模型的演进,如图1所示,产品数字化定义技术由2D图样发展到基于模型定义MBD (见图2),使数字化技术日趋成熟,也得到了广泛而深入的应用,加上近代网络技术的发展和普及,使数字化技术扎根于工程应用中,真正成为工程设计、制造和维护的有力工具。长期以来,工程师的语言——蓝图发生了“翻天覆地”的变化,彻底地改变了产品研制的方法,使研制数字化、管理信息化和产品智能化成

为可能,如图3所示。它是实现全价值链数字化的核心技术,是实现智能制造或“中国制造2025”的主要技术基础。

2. 工程图样技术

在1760~1850年的百年西方工业革命期间,随着很多新技术在机械领域的出现,迫切需要有一种能精确描述复杂机械产品图形的方法。

1795年,法国几何学家加斯帕·蒙日系统地提出了以投影

几何为主线的画法几何,把工程图的表达与绘制高度规范化、唯一化,从而使得画法几何成为工程图的语法,工程图样成为工程界图形化产品定义的基本绘图语言。蒙日将积累起来的在平面上绘制空间物体图像的理论 and 实践加以系统化和概括,于1795年发表了《画法几何学》,成为200年来工程图的基础。其原理现在看来并不复杂,它是把一个复杂产品 (飞机或建筑物)放到笛卡尔坐标的第一象限中,把它们的形状和结构投影到不同视图的平面上,如图4所示,然后把这些不同视图布置到一张图样上,形成产品的设计图样,也就是后来统称的产品定义。

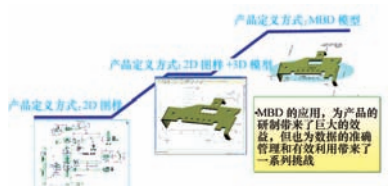


图1 几何模型的发展阶段

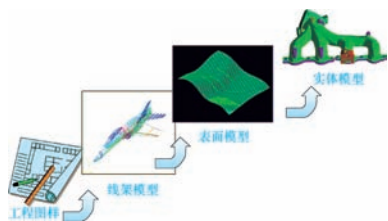
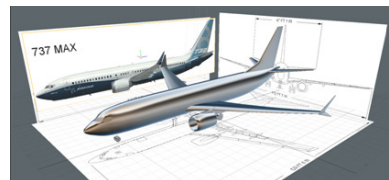


图2 产品数字化定义的发展阶段



图3 全价值链数字化示意图



(a)



(b)

图4 工程图样形成原理

当然，工程技术人员在实际的设计中，把自己的“设想产品”通过绘图工作描述出来，这是产品的定义过程，这过程远不像其原理所说的那样简单。无论是机械产品，还是建筑物的复杂三维空间物体要“落实”到平面图样上（见图5），绝非易事。工程技术人员必须经过认真的“工程图学”理论学习和严格的实际工程图绘制训练，才能担当设计者的重任，完成对产品的定义工作。

图6 所示为早期设计者在图板上用手工绘制设计图样情况。为了方便工程技术人员设计绘制图样，在这期间制造了专用

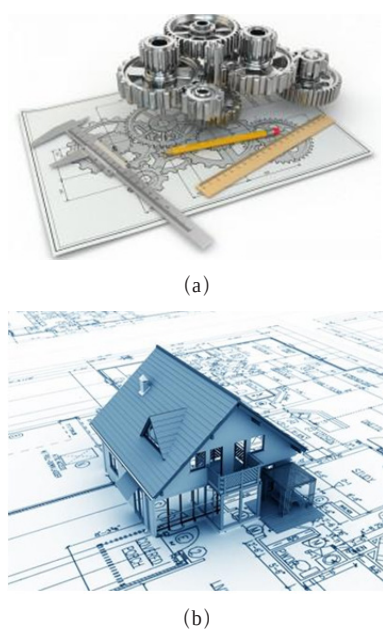


图5 复杂的机械产品和建筑物及其图样



图6 早期设计者在图板上用手工绘制设计图样情况

绘图板及其一些绘图工具，用来绘制平行线、垂直线、成角度线和曲线等，以此提高绘图效率。图7所示为设计人员在专用绘图板上设计绘图情况。在上世纪里我国一些设计院所里的设计室也是这种情况。

由于工程技术人员在设计时，使用铅笔绘制的是“白图”图样，是一种“底图”，而且就此一份。但在实际工程应用中，企业多方面人员需使用这种图样。当时没有现在的复印设备，因此，需要把设计员绘制的“白图”，由专职描图人员把它们描制到一种半透明的纸上，再通过一种专门技术，晒制成多份蓝图，然后供技术人员和管理部门使用，图8所示为一套描图工具及其描制好的图样。当时无论是设



图7 设计人员在专用绘图板上设计绘图情况



(a) 一套描图工具



(b) 描制好的图样

图 8

计员的绘图，还是描图员的描图都是一项需要专门技术和极具耐心的工作，而且不仅需要智力，还需要体力。

上述的蓝图是在1840年由英国工程师发明，它使工程图样能广泛应用于当时迅速发展的工业中，反过来它又在很大程度上促进了近代工业的大发展，蓝图真正成为工程师的“语言”。

为了使工程师的“语言”成为“普通话”或“世界语”，以便促进世界工业的发展，世界各国制定了工程图样绘制的标准或规范。我国也是这样，1956年机械工业部颁布了第一个部标准“机械制图”，1959年国家科学技术委员会颁布了第一个国家标准《机械制图》，随后又颁布了国家标准“建筑制图”，使全国工程图样标准得到了统一，标志着我国工程图样绘制进入了一个崭新的阶段。这样，蓝图成为世界工程师们的通用“语言”。

3. 计算机辅助绘制图样技术

在20世纪80年代，开始使用交互式图形显示器，它可作为计算机的外围设备，或与计算机组成交互式图形工作站（Interactive Graphics Workstation），如图9所示。图10所示为图形显示器上的二维图形，后来这些交互式绘图系统（Interactive drafting System）逐步移植到微机上，如美国AutoDesk公司在微机上研发的AutoCAD是典型的交互式工程绘图系统。图样数据的.dwg文件格式成为二维绘图事实上的图样数据存储的标准格式。

原来作为计算机外围设备的绘图机，由笔式绘图机发展成为



(a)



(b)



(c)

图9 交互式图形工作站

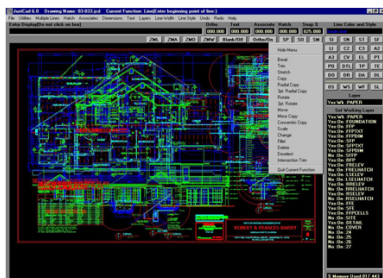


图10 图形显示器上的二维图样

现在的黑白或彩色喷墨绘图机，它们不仅能绘制各种工程图样，而且能高速连续地绘制各种彩色图形，目前像片也可打印出来，彩色喷墨绘图机如图11所示。

交互式工程设计绘图系统绘制的工程图样是产品设计的最

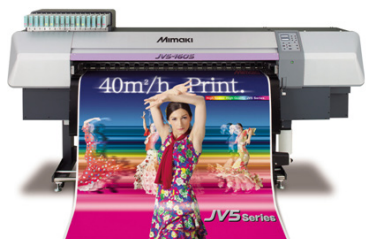


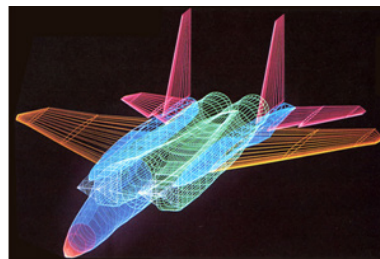
图11 彩色喷墨绘图机

终描述，也是工程技术人员对产品的数字化定义。但是，交互式工程设计绘图系统是在完全模仿技术人员传统的手工设计和绘图方法情况下研制的，它迎合了自1760年开始的西方工业革命以来所建立的绘图方法。这一方法很明显不仅效率低、不直观，也不能完整精确地描述一个产品的设计。要真正完全读懂一幅较复杂的产品图样，要具有一定经验和很强的空间想象能力。作为产品数字化定义的二维工程图样数据，也难以被后续环节直接使用。在复杂产品的研发领域里，如船舶、车辆和飞机的研制过程中，交互式工程设计绘图系统有着明显的局限性。

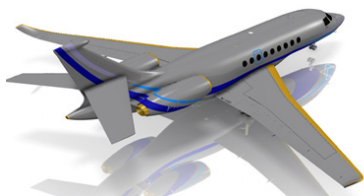
4. 三维几何造型技术

计算机的出现，使产品描述的通用介质突破了“只有长、宽两种尺度的图样”。人们逐步把三维模型引入到工程定义中。在计算机技术迅速发展的时代里，人们就很快投入到三维几何造型系统的研究和开发工作。

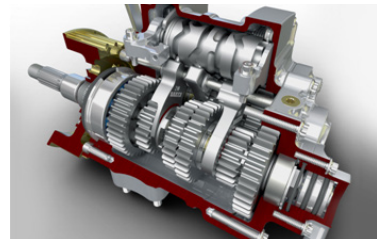
三维几何造型系统一般是在计算机图形系统（Computer Graphics System）的基础上进行开发的，而且与原有的交互式工程绘图系统紧密集成，组成功能完整的CAD系统。系统中具有线框（Wireframe）模型、表面（Surface）模型和实体（Solid）模型，如图12所示。后来又增加了特征设计功能，当然还有很多其他功能，诸如消除隐藏线、图形的上色、与NC加工程序的集成、数字模拟仿真（见图13）以及有限元网格自动生成等功能，真正成为工程技术人员进行产品



(a) 产品的线框



(b) 表面

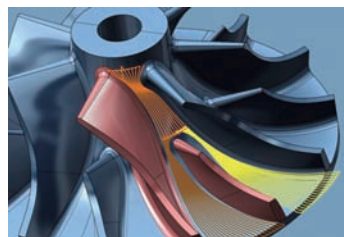


(c) 实体模型

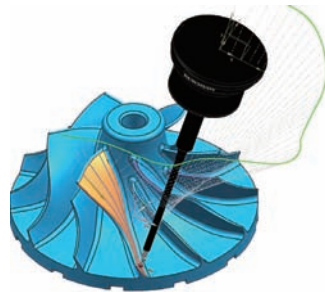
图 12



(a)



(b)



(c)

图13 零件加工仿真及刀具路线和检验仿真

设计的有力工具，使产品定义由二维数字化定义向二维图形+三维模型的数字化方向发展。现在这些系统的功能更加丰富，能力更强，具有混合造型、基于网络的协同工作环境以及支持基于人工智能的知识工程结构等功能。

在这一阶段，工程技术人员使用计算机绘制的一系列图样再加实体模型进行数字化定义产品，如图14所示，无疑在数字化定义产品道路上跨进了一大步。

但在此阶段，二维图样仍是制造依据，尤其在进行数控加工编程时，工艺设计人员按照图样所定义的零件形状、尺寸和公差进行程序设计，而三维模型仅作参考使用。也有把三维模型作为数控加工的依据的，但二维和三维并存情况带来很多问题。

在通常的CAD系统中，工程技术人员所建立的产品数字化模型仅是三维几何模型，而制造工艺信息还在二维图样上。这样仅依据三维几何模型往往难以进行产品的生产和检验。也就是说，三维模型中没有让技术人员以立刻明白的方式，将生产工艺、模具设计与生产、部件装配、部件与产品检验等工序所必须的设计意图添加进来。三维模型虽然包含了二维图样所不具备的详细几何形状信息，但三维模型中却不包括尺寸和公差的标注、表面粗糙度、表面处理方

法、热处理方法、材质、结合方式、间隙的设置、连接范围、润滑油涂刷范围、颜色、要求符合的规格与标准等仅靠几何形状而无法表达的(非几何)信息，即制造信息。另外在三维建模中，基于形状的注释提示、关键部位的放大图和剖视图等能够更为灵活而合理地传达设计意图的手段也存在不足。这在实际工程中就产生既用三维模型、又离不开二维图样的矛盾状态。从数据管理看，产品物料表又在另外系统中，这样数据源的多元性难以保持数据的一致性。基于这些所面临的严重问题，美国机械工程师协会于1997年在波音公司的协助下开始进行有关MBD(Model Based Definition)标准的研究和制定工作，于2003年成为美国国家标准“Y14.41 DIGITAL PRODUCT DEFINITION DATA PRACTICES”(数字化产品定义数据的实施)。

5. 基于模型定义MBD

三维模型在工程定义中的地位从参考、辅助过渡到主导。随着三维建模技术的日趋成熟，使数字化完整准确定义三维产品成为可能。基于模型的数字化定义技术(Model Based definition, MBD)是具有三维模型主要元素的完整产品定义，它把制造信息，如尺寸和公差等信息都标注到三维模型上，不再使用或依

赖于二维图样或正投影视图为主要制造依据，是数字化定义的最新阶段，如图15所示。基于模型定义MBD技术不仅仅是把尺寸和公差等信息都标注到三维模型上，而且用文字和数据表达的设计、工艺和检验的要求信息也与三维模型相关起来，用规范树来表达，如图16所示。所以，基于模型定义MBD的产品定义模型的内容包括设计模型和规范树，完整地定义了数字化产品模型。一般把具有尺寸和公差等制造信息的三维实体模型(称作设计模型)及在规范树中用文字和数据表达的设计、工艺和检验等制造相关的要求信息(Product Manufacturing Information, PMI)共同组成了技术数据包(Technical Data Package, TDP)。图17所示为由二维图样转换为MBD的定义方法实例，图18所示为基于模型定义MBD的尺寸公差标注方法。图19~图22所示为MBD的产品零件定义实例。

美国波音公司在研制新的787

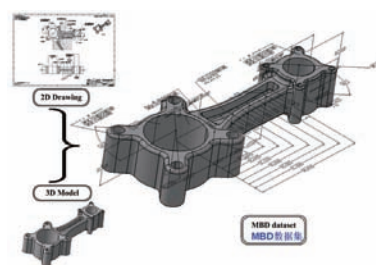


图15 由2D图形加3D模型向MBD发展

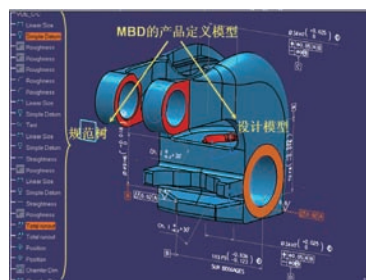


图16 基于模型定义MBD的内容



图14 二维图样加实体模型的数字化定义产品

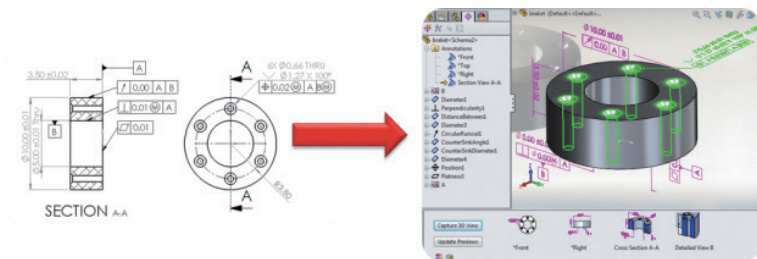


图17 由二维图样转换为MBD的定义方法

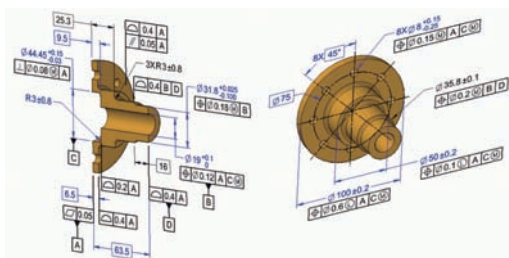


图18 基于模型定义MBD的尺寸公差标注方法

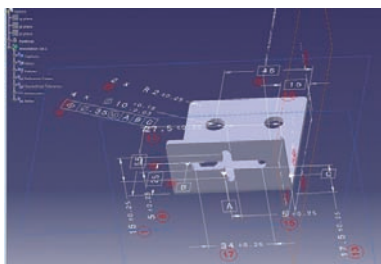


图19 钣金零件MBD定义实例

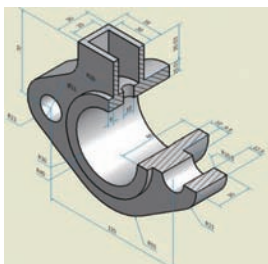


图20 机加零件MBD定义实例

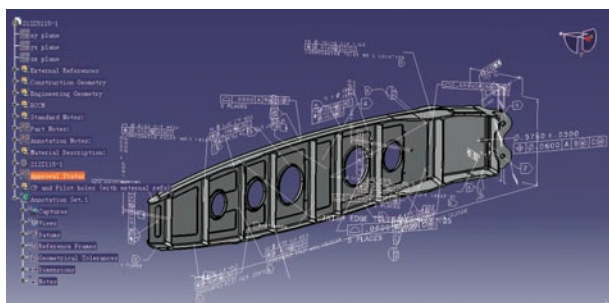


图21 复杂机加零件MBD定义实例

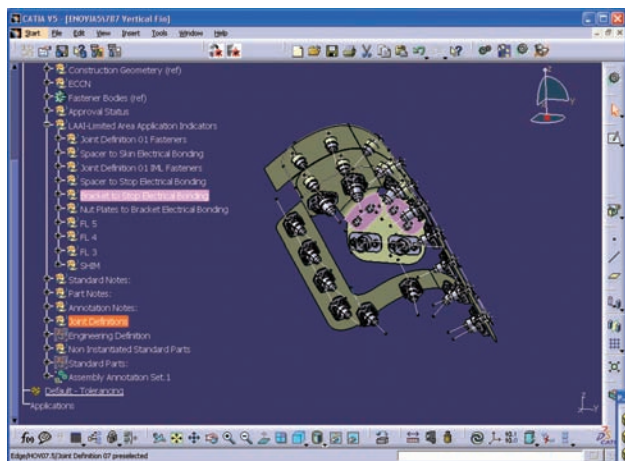


图22 装配件的MBD定义实例

客机中率先全面应用这一技术，我国成都飞机制造公司和沈阳飞机制造公司等企业在与波音合作中，同步应用了MBD技术，并且都取得了十分明显的效益。由于其无可比拟的直观性及与其他计算机辅助技术的集成，渐渐成为新的工程定义的标准，最终必然得到推广并取代二维图样文化。

新技术的应用常常会带来一些新的问题，MBD技术也是一样。首先要研究原来的二维表达方法，转到MBD方式定义时要做哪些改变。这样才能促使着人们不断地去发展、完善、充实MBD的表达形式、内容和方法。这个发展的进程中总会有一些新矛盾产生，如数据传输与交换问题（见图23），实体模型经IGES转换后成为线框模型。人们在解决这些矛盾的过程中，对MBD技术的认识由浅入深，由零散发展到系统化。

所有与产品定义相关的数据都在定义MBD中，可通过PDF文件传输。为方便使用，尺寸和公差等数据是据后续工作（加工、装配或检验等）的需要进行标注，可按视图存放在不同“层”中，如图24所示；另外，现在多数情况下产品是协同设计、制造的，这样不同供应商之间可能用着不同的CAD/CAM系统。目前，在不同系统间进行MBD数据的交换也得到了较好的解决，如图25所示。

6. MBD向MBE发展

波音公司所提供的787产品设计的MBD数据集，具有完整的产品信息，集成了以前分散在三维模型与二维工程图中的所有设

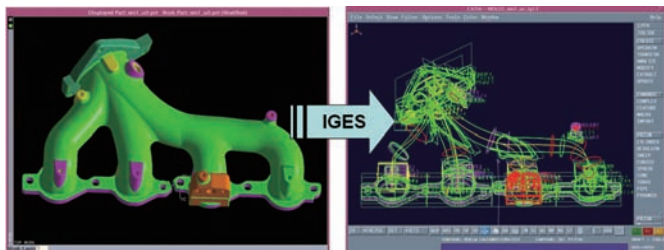


图23 实体模型经IGES转换成线框模型



图24 不同视图数据存放在不同“层”中



图25 不同系统间进行MBD数据交换设计与制造信息。波音公司为787客机研制项目专门构建了基于MBD的全球协同设计环境GCE (Global Collaborative Environment), 使波音787飞机不仅具有完整的几何数字样机, 而且具有性能样机、制造样机和维护样机, 较好地解决了产品数据的管理和交换问题, 便于波音公司与分布在全球的合作者能跨地域、跨时区顺利地进行产品各项功能的协同研制工作。所以, 产品的MBD数据贯穿于整个产品的研制过程, 使波音公司成为基于模型企业 (Model Based Enterprise, MBE)。初步体现了德国工业4.0中提出的信息物理系统, 奠定了智能制造的技术基础。也可看到, 波音787项目GCE的技术水平总体上优于欧洲空客公司A350客机的数字化研制系统, 空客公司也公开讲过要全

面地参照波音的数字化系统改建自己的系统。

这样, 波音公司利用GCE数字化环境对787飞机的总装配全过程 (见图26) 进行了数字化仿真模拟 (见图27); MBD还贯穿于零部件的工艺、工装和检验设计与仿真过程, 如图28所示。从此也可体会到, MBD的产品数字化定义是信息物理系统CPS的数字主线。

波音公司在新机787的研制中以GCE平台为基础, 成功地建立了MBD技术体系, MBD技术体系规范了数据的操作要求, 而GCE平台则借助iPSM (integrated Product Standards Management)、MVA (Multi Value Attribute) 等系统和接口实现了工艺工程人员在设计过程中与设计人员的数据共享。MBD技术体系的另一个特点体现在对各种数字化设备的集成应用中, 通

过GCE平台到生产现场的管理系统, 基于MBD的产品信息可以最终传递到生产和检验的设备中。它覆盖了从顾客提出对飞机的用户要求开始, 直至飞机设计、制造、交付出厂以及投入航线后的服务工作, 是基于能覆盖全球的、完整的数字化网络信息系统的, 也可以说, 初步体现了“工业4.0”中信息物理系统CPS。所以波音公司是真正基于模型企业MBE。

在787项目的带动下, 波音公司的主要承包商及其软件供应商也向MBD技术体系过渡, 如英国Messier-Dowty公司在787主起落架研制中应用基于模型的定义技术, 贯穿于整个产品设计、工艺工程、生产制造和检验的过程。并且, 基于MBD技术的全球协同环境GCE在新机787项目中的成功应用, 可以说是美国先进制造技术方面的一个突破。引起了美国国防部 (DOD) 和国家标准与技术研究所 (NIST) 等部门的关注, 要把MBD技术发展到基于模型的企业 (Model Based Enterprise, MBE), 并把它纳入到“国家制造创新网络”大项目中, 作进一步的深入研究、应用

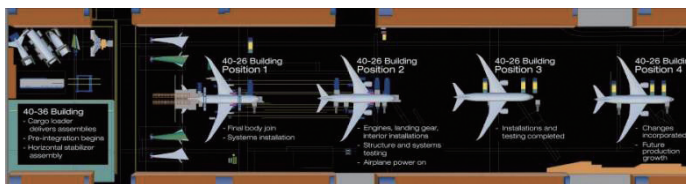


图26 波音787飞机总装配线



图27 787总装配数字化仿真模拟



图28 787 MBD用于工艺和工装设计

和推广。

美国国家标准与技术研究所（NIST）在国防部（DOD）的协助下，全力展开有关基于模型的企业MBE技术的标准化及其应用研究工作，主要针对飞机、舰船和车辆等复杂的国防工业产品，如图29所示。从2011~2014年，每年都召开全国性的基于模型的企业MBE高层会议（Model-Based Enterprise Summit）。会议指出，MBE是把MBD作为产品的“主”模型，因它完整而准确地表达了产品的设计，并在全企业内以数字化信息贯穿于产品的全生命周期。虽然MBD建立在产品生命周期的开始阶段，但直至以后产品制造、检验、运行



(a)



(b)



(c)

图29 MBE实施对象

和维护阶段都可以重复使用，如图30所示，它是智能制造的数字



图30 基于模型的企业MBE

主线（Digital Thread for Smart Manufacturing），也是航空航天可持续制造的创新。

7. 结语

基于模型定义（MBD）技术无论从理论上还是从企业的实际应用效果看，它是机械产品数字化研制技术的必然发展趋势，也是美国先进制造技术、德国工业4.0以及中国制造2025实施的主要基础技术或前提。**MW**

（收稿日期：20150729）

北京市洁宝日化公司脱袍剂生产厂迁址更名通报

因北京市有关政策和公司发展需要，现我公司已将脱袍剂生产厂及生产设备已经搬迁至哈尔滨市平房区。新迁址公司名称注册的是：**【哈尔滨昭明洁宝科技发展有限公司】**该公司已于2014年12月1日正式运营。特此通告！



感谢新老朋友的理解和一如既往的支持，并欢迎来哈指导、做客。

脱袍剂专利发明人闫连生与哈尔滨昭明洁宝公司总经理陈新在此共同向各位同仁朋友致谢！

脱袍剂目前供应价格每箱400元不变，因地区运输原因全国各地发货一律走佳吉快运，款到发货。一箱以内运费（到付）由需方承担，两箱以上购买脱袍剂给予优惠免除运费，特此告知！

哈尔滨昭明洁宝科技发展有限公司

地址：哈尔滨市平房区平房铁道西（150066）

电话：0451-51845271

脱袍剂发明人闫连生咨询电话：13901223842

昭明洁宝公司总经理陈新电话：13349515571

开户行：中国农业银行股份有限公司（哈尔滨东安支行）

账 号：0805730104006219

税 号：230108300891159

◆广告查询编号：1849