



Digital Engineering of Factory and Process

德国斯图加特大学 E. Westkamper



E. Westkamper

现任德国斯图加特大学工业制造和企业运作研究所 (IFF) 所长、富兰霍夫生产技术和自动化研究所 (IPA) 所长、国际生产工程学会 (CIRP) 会员。主要从事现代企业结构、生产模式、数字制造、制造战略等方面的研究。先后发表论文 800 余篇、指导 150 余位博士研究生。

工厂作为一个“社会-技术”系统是应该可以进行优化的。与复杂产品的开发过程相似,我们应该有条理而系统化地运用现代化工程工具对工厂进行不断规划和持续改进。

在世界市场上,德国的机械制造业尽管并没有占据最有利的地位,但它却能称得上是德国经济的核心竞争力。德国机械制造业的优势不仅基于卓越的工程和生产技术,还在于能够依据工厂的实际需求,不断提供他们所需的技术来建造世界上最好的工厂。

工厂是一个复杂而持久的产品。从系统工程的角度看,工厂将输入参数通过转换过程,生产出高附加值的产品,从而实现增值。因此,工厂作为一个“社会-技术”系统是应该可以进行优化的。与复杂产品的开发

过程相似,我们应该有条理而系统化地运用现代化工程工具对工厂进行不断规划和持续改进。本文介绍一个参考模型,描述可集成的工厂和过程的规划工具及其应用范围。

工厂是一个产品

在单件小批量生产中,由于产品、生产规模、技术和生产任务都在不断变化,工厂在动态和剧烈变化的环境中运营,必须持续改进工厂和过程,随时加以调整。如果不进行必要的调整,就会导致工厂资源利用效率的降低。换句话说,只有当生产系统

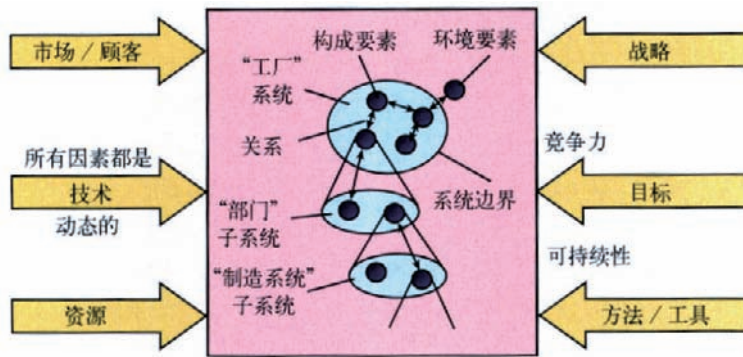


图1 复杂的工厂系统

保持在足够高的柔性和适应能力的环境下,才能在动态的环境中生存,如图1所示。

在产品差异化和技术更新换代急剧加速的影响下,工厂重新规划和改进的频率和速度也日益加快。随着产品复杂程度的增加,掌握工厂这个系统和要素及其关联的复杂程度和必要性也在不断提高。为此,工厂和过程的设计者和工程师们需要更有效的工具来应对新的任务。

我们应该将工厂看作一个完整的生产系统。决定竞争力的不是单个的过程,而是整体的系统,单个过程的优化不足以挖掘出所有潜力。还更需要考虑过程相互之间的干扰,这样才能全面优化整体系统与周边领域的效率,才能够避免损失和浪费,从而提升整体系统的经济效益。

高工资和高生产成本是导致德国工厂的竞争力下降的直接原因。但过去几年取得的成功经验表明,借助技术创新、面向客户和产品高可靠性的优势,企业就能在一个高工资的地区内生存和发展。换句话说,德国企业的生存之道在于:面向客户和构成生产系统这一“产品”的所有要素都具有卓越的效能。

厂房建筑、基础设施、设备和过程固然是工厂这个“产品”的构成元素,应精益求精。但在工厂中工作的人也是系统的一部分,他们的工作表现和业绩,通过工厂设计和组织管理,为工厂获得经济效益做出了决定性的贡献。

毫无疑问,生产系统的整体和快速优化是竞争策略的重点之一。在网络化生产的时代,生产系统的平衡界限必须也包含其上游、下游以及周

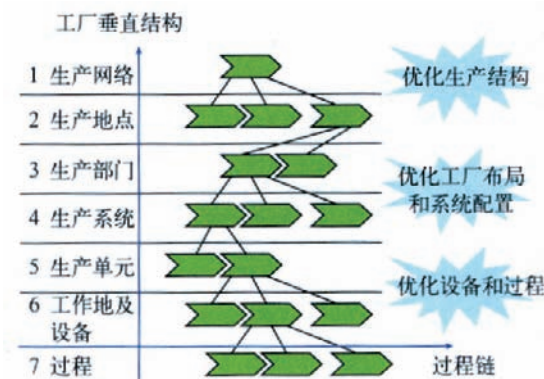


图2 不同层次的优化目标

边领域。因此,有必要将创造价值的过程链放于核心地位,从创造价值的贡献角度去一一评价周边领域。因此,生产系统不仅是加工过程,还包含了工厂内部和外部的物流、信息系

统和基础设施。

工厂系统可以划分为7个层次,如图2所示。纵坐标是工厂结构,从分布在不同地点的工厂到生产过程。横坐标是过程链,每一层都有自己的过程链。只有当工厂结构和过程链同步优化时,才能实现生产系统的整体优化。

在规划时,利用技术手段实现生产过程高绩效、资源和能源利用优化占有优先地位。统计表明,工厂经营者对智能产品(机器、模具、生产工具等)最感兴趣,他们期望机器和设备能够更加可靠并且降低运营成本。

同时,人们也在寻求高能效、原料消耗少和有害物质排放低的设备和工厂。此外,对于生产和装配系统,人们还希望通过技术系统的模块化和生产系统的自适应性达到较高的优化能力,如图3所示。优先级排序不是固定不变的,根据具体情况的变化不断调整。

通常“高绩效”和“自适应生产系统”的优先级总是最高。在某些行业中,物流或供应链的缩短也具有较高的优先级。

掌握优先级是非常重要的。例如,当企业认为产品工程需要数字

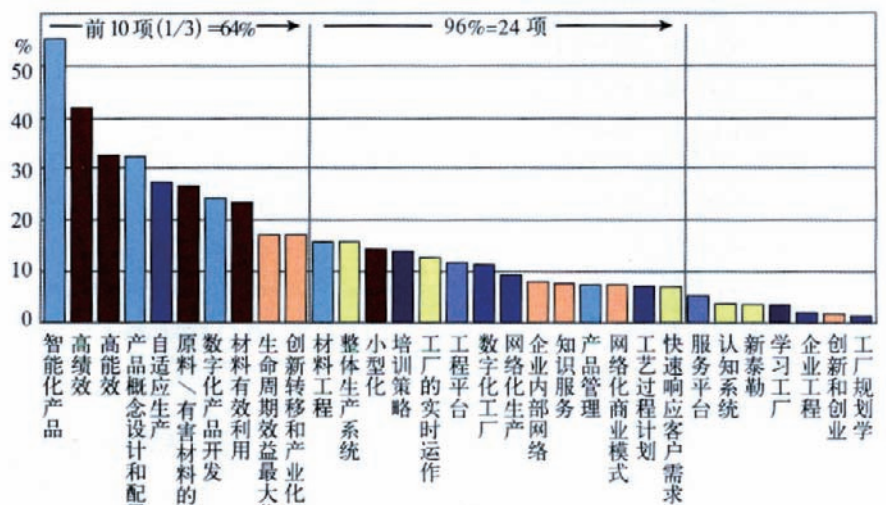


图3 技术措施的优先级排序

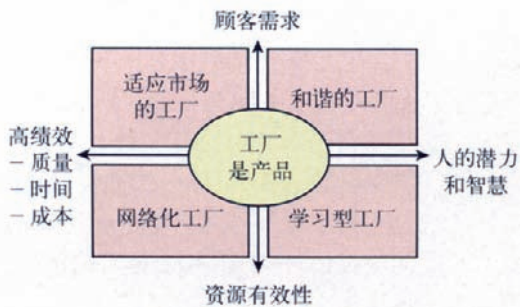


图4 高绩效工厂的类型

化工具(如 CAD 和 PDM),但同时却把发展数字化生产(如 ERP 和 MES)的优先级排在很低时,优先级的排序就会变得不合理。与之相反,数字化工厂在应用中具有较高的优先级,数字化产品开发的应用就顺理成章,才能发挥更大的效益。显然,后者在理念上已经领先了一步。

工厂的专门化与优化

工厂遵循产品和市场的技术需求和经济需求,受到所应用的制造技术和资源投入以及组织管理的影响和制约。过去是按车间和流水线原则确定工厂的结构,而如今是一个整体生产系统。当前,瞄准特定战略目标的工厂规划方法越来越受到人们的关注。图 4 为 4 种不同的工厂规划方法。

许多企业,特别是那些以多品种小批量生产为主的企业,都以高度的自适应性和优化能力为目标,遵循面向客户和面向市场的原则(大规模定制),以满足市场的需要。应该指出,大规模定制的工厂平面布局将根据不同客户订单的物流进行调整。此外,弹性工作时间模式可以为缩短供货周期创造空间,降低库存。

另外一种类型的企业通过网络化,将加工外包,集中精力在其核心技术的方式来减少加工深度,提高竞争力。他们借助零部件供应商的技能与技术,在那些工资水平较低的地区进行生产。物流网络的管理和优化必须是有组织、有结构的。投入资源的有效性是规划的首要目标。

第三种类型是学习型工厂,主要以持续改进和学习能力作为工厂结构的核心。资源的利用包括了对人力资源的激励。通常可以通过工厂的组织结构、销售与规划之间的交流缩短创新历程,合理奖赏,并能很快地将创新的构思变成现实。

此外,通过激发情感也可以满足顾客需求和提高工作人员的绩效,建立和谐的工厂。客户可以参与产品的设计和装配,而供应商的积极性是

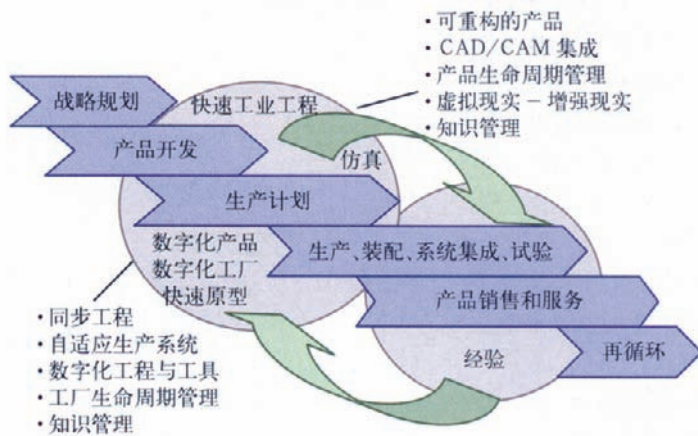


图5 数字化和知识工程

通过产品在市场上获得成功来激发,即所有领域的工作人员、供应商和外部服务商直接参与市场竞争,都能为产品能够获得成功尽自己所能,献计献策。

上述各种类型的工厂之间必然有很大的冲突。无论企业采用的生产战略如何,都会对工厂的布局设计、工程以及过程有深远的影响。因此,人们应确立这样的生产策略:一方面,这个策略可以实现规划和销售的指导方针;另一方面,这个策略必须时刻遵循企业的战略目标。

工厂和过程工程的构思

缩短交货期,减少产品和生产工程的浪费是所有企业的核心目标。这个目标只能通过过程的系统化、和

谐化,并使用有效的方法和工具才能实现。对快速、可靠、有明确目标的设计的追求称为“快速工业工程”。诸如设计方法论、模块化或全面质量管理之类的方法都有利于提高工程系统的效率,如图 5 所示。

现在,几乎所有企业的产品设计都是用 CAD 来进行的。但是仅有少数企业实现了设计、计算、分析、生产计划和质量管理的集成。

原则上,这种概念也可应用于“工厂”这个产品和其众多技术的构成要素上面。如果能够激发合作各方的协同潜力,则能使他们的优势叠

加。这就要求接口、系统工作方式和能力都达到统一的标准,在工厂和过程工程的网络中进行合作。

1 工厂和过程规划的参考模型

通常有许多组织机构参与一个工厂的规划、实施和改进,相互交织的过程必须加以协调,才能大大缩短从改进开始到实施之间的周期。此外,必须通过规划和开发过程的协同来提高效率和效益。

图 6 所示是一个工厂和过程规划(参考模型)的主要任务和职能范

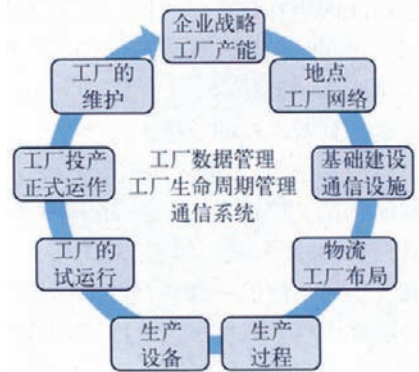


图6 规划的参考模型

围。它以一个工厂的生命周期为走向,涵盖了从企业战略策划直至拆毁过程中的所有阶段。对于新工厂的规划,必须经历所有阶段。对于改进规划而言,只经历其中的一部分或单个过程。

鉴于参与规划的单位众多,需要建立一个统一的数据库,即产品数据管理系统(PDM)。先进的PDM系统既可支持产品数据管理,也支持工作流程。原则上这些数据都可在工厂网络内传递。但需要用统一的语言来描述工厂内的所有物体和流程。

2 企业战略和工厂产能规划

企业的产品和市场战略是生产发展的基础。在战略规划中确定了产品开发、产能和投资额的主要经济性数据。因此,工厂需要一个相对长期的生产规划和零配件外购规划,其中还必须包括生产方案的合理化,应当明确额定产能和弹性范围。

由此可见,企业战略和产能规划是一个在预期产品技术和生产技术影响下提出的生产方案。图7描述了在企业战略的框架下,制定产品、产品技术和生产技术的时间顺序和产能规划。

遗憾的是,到目前为止,仅有少数数字化工具可以辅助工厂的产能规划,从合理化作用和计划措施的角度考虑,它们可以在一定程度上系统而逼真地辅助完成布局和分析、销售规划、产能规划和制造成本规划。

3 工厂结构规划

制造型企业的结构规划通常是一个中长期的规划,其设施都是一些不动产和长期资产。其中包括:工厂地点、生产网络、厂房和基础设施、物流交通线路、信息的接收与发送系统、能源供应以及外部服务。从长远需求的角度考虑,由于环境问题、对污染排放量的限制以及原料价格上升,规划的重要性在不断地上升,要求谨慎地开展这些工作,主要有以下几方面:

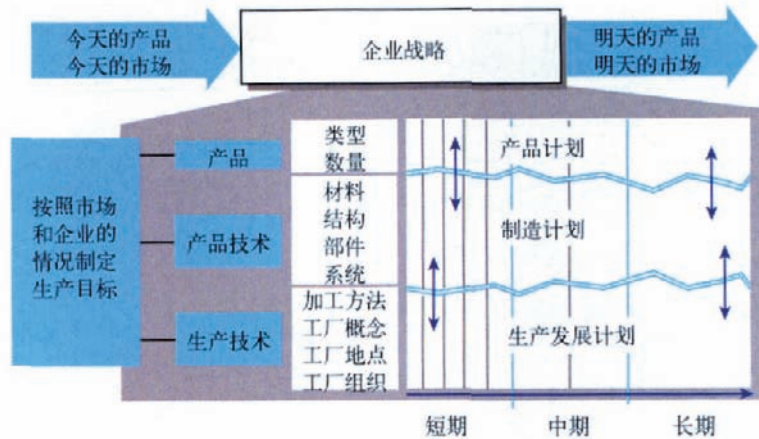


图7 产品和产能规划

(1) 地点和工厂网络规划。产品的结构在一定程度上会受到生产地点和网络的影响。工厂选址应当考虑的是:工厂地点因素对工艺流程和成本的影响。许多企业偏向于选择坐落于发展潜力大、教育水平高(不仅是本公司的工作人员)、工厂周围直接有专门技术可供使用的地区。

网络化可以给工厂选址带来很大的柔性,规划的核心主要是网络中的物流和企业的内部分工。采购和销售物流尽可能按准时生产原则直接将物料送到工位上或者过程链中。设计方案的发展趋势是要求物流路径短、无瓶颈。

(2) 建筑物和通信设施。许多企业都是先建造厂房,再规划各种设施,这种传统方式已经过时。如今,厂房的利用必须要有一个优先性、侧重性,以高绩效、可优化性为前提。许多区域需要特殊的条件,例如恒温、通风和排气、原料供应、无放射性物质、无尘等。建筑规划中还涉及到信息的接收和发送,使得建筑物可以与外界紧密沟通。

应当邀请企业内外人员的共同参与,在尽可能短的时间内,完成厂房的规划,这也就意味着:有效的交流在很大程度上可缩短规划完成的时间。在这个阶段,产品数据管理和产品文档之类的工具可以大大改善交流问题。

将来总要对厂房进行维护和改

建。因此,许多专家认为提高能效有着越来越高的经济意义。此外,人们也在为一些工厂寻找这样一种解决方案:使工厂符合未来发展、物流变化的需要。今后,修改规划和调整业务流程的频率都会上升。

规划工程师们需要各种各样的工具,来进行布局设计、计算和分析。这些工具与工厂数据的结合是非常必要的,例如将“同步工程”原理与“众人参与”规划结合在一起,运用工作流程管理系统等。

(3) 工厂内部物流和布局的规划。工厂建筑物和环境系统的改进是中期措施,然而面积的利用率却永远是随着产品和批量的变化而变化的。在加速物料流动(物流参数)、增加产品多样性、持续改善过程的大背景下,为了挖掘工厂更大的产能潜力,必须持续优化面积利用率、调整设计方案。通过制造和装配系统的模块化,可以随着加工任务的变化而调整布局,同时还可以留出宽敞的活动空间。

4 过程、机器和设备的规划

这方面的规划遵循产品种类和批量的变化,以及技术上和经济上的加工要求。这些规划阶段承受着巨大的时间和交货期的压力。因此,要严格按照时间要求规划和采购产品专用的生产工具,如模具和工装。

随着产品多样性的增加,对生产效率的要求日益提高,对规划工作的

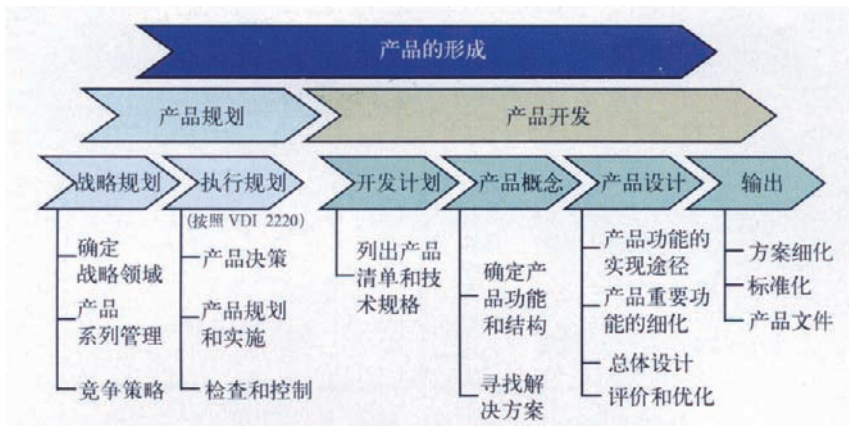


图8 系统化的产品开发流程

需要也在迅速上升。所以,应大量使用数字化工具,使产品开发过程一体化。

机器和生产工具的开发决定于产品开发。柔性高、效率高、过程安全可靠是技术开发的突出指标。

5 工厂的运行和使用

工厂的运行和使用包括试运行、正式投产和维护3个阶段。

(1) 试运行和调试。直到工厂系统生产出零部件时,才能确定下具体过程。然而,事实上生产是从工厂调试开始的。原则上,计划和设计的“理论”方案(虚拟世界)与“生产实际”之间肯定有误差。制定的“理论值”越不精确,或者技术方案越新颖,则误差就会越大。特殊的制造和装配系统的原型,以及工厂内的新设备,增加了实际工作和调试过程中的不确定性。

这里可用的工具是通用项目管理系统,利用这样的工具可以监督和控制洗面周期。人们在这个阶段渴望尽可能快地获得数据、信息和资料。

(2) 工厂投产。工厂投产包括工厂的所有功能。此时会显示出规划和现实之间的差异。在开始运行阶段,主要是使生产迅速稳定下来,达到计划的产能。在之后的时间段内,主要是对投产进行改进。系统与系统之间必须一体化、可自我调整。这里所说的一体化并不仅仅指机器

和生产工具的技术性能,也涉及到信息和管理系统的一体化。其中包括“制造执行”功能,以及机器和过程的故障诊断技术。在运行过程中,机器和工具会不断改变它们的状态,人们可以获得经验。

制造商和用户开始合作时,要遵循共同优化使用的原则。这种商业模式成功的前提是:双方可以互相获取关于技术系统使用情况的文档和信息。

在投产阶段,工厂设备的生命周期管理和生产技术手段是与用户之间的桥梁,可以起到同步优化和调整系统的作用。

(3) 工厂的维护。在运行过程中的干扰、故障和停机会限制生产工具的有效利用。通常,大型的企业会

将一部分资源投入在维护工作。小型的企业则依靠制造商的服务。正如商业过程中的接口问题那样,状态参数、文档、潜在故障、故障诱因和排除措施的共享对使用效率起着举足轻重的作用。

当遇到“非计划中的”突发情况时,可以在设备管理的管理系统中找到辅助工具。

6 方法和步骤

为了系统化地设计和开发产品,要进行模拟和仿真,如果我们把工厂也看作是产品的话,那么也要对工厂和过程工程进行仿真,确定步骤顺序,可以有目的地、系统化地展开工作。

图8是产品开发的流程,从产品规划直至设计完成,按时间顺序步骤越来越精确详细。然而,要确保产品开发的成功,考虑到各种新的奇思妙想,这样一种普通的步骤模式往往是不够的。此外,一些企业还在寻求控制开发过程的方法,以保证时间和成本目标。对于复杂的、有一定风险的开发设计,则要使用“质量关卡”。

质量关卡法是以单个过程的基本参考模型为基础,当并行工作到达抉择点时,分析判断完善程度、现存风险和花费。在某些情况下,可能会中断开发或更改目标。原则上,这种

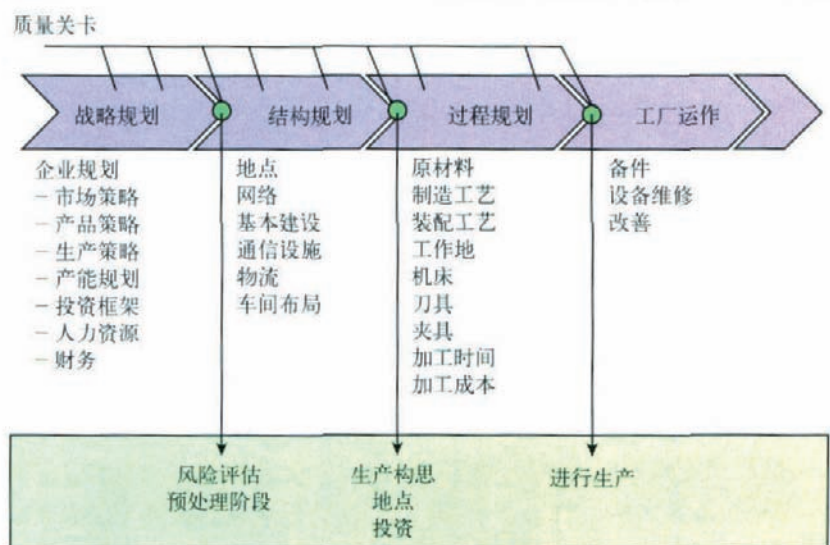


图9 系统化工厂和过程规划的质量关卡

方法也可用于生产的开发。图9中指出了主要的抉择点。从中可以看出,确定战略、规划基础设施、开始进行生产之后的抉择点尤为重要。

开发人员总希望能够通过战略性的规划来决定那些主要的参数,例如确定应长期制造的产品、产能指标

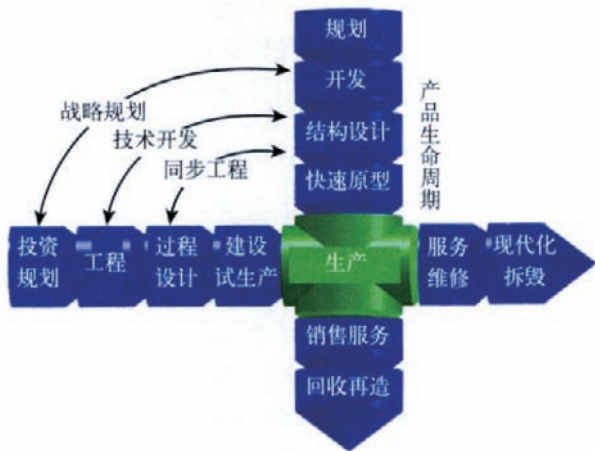


图10 产品和工厂的生命周期

和工作指标、成本和绩效目标,以及主要投资参数。关于基础设施的抉择点上,应当回答地点问题,即生产结构、生产网络中的物流路线。

每个阶段都应细分成一个个步骤,然后再对此进行细化。粗略的和详细的规划阶段也可以交织成一体。最后,可用一个完善程度来评价规划结果,这里的完善程度仅以“工厂”这个产品为考察目标,而忽略达到经济目标的程度。

此外,为了合理化地完成工作,应当将各个过程阶段中的方法结合起来使用。这样的方法可以是:产能规划、工作规划、过程规划。

这种方法步骤具有结构明晰的过程和质量关卡,与产品开发相比,其特殊之处在于:在大多数情况下不用重新设计,而只要对现有的、正在运转的工厂改进设计一下就可以了。我们可从中得出这样的结论:工程步骤也可以从处于底层的阶段开始。但是,无论如何都要对现状进行分析,将战略目标和产能规划加以对比。

数字化的知识工程和工具

1 生命周期管理

以前,制造商们将精力注重于产品的进程和成本的最小化。而如今出现了一种新的商业模式:在整个生命周期中寻找能够创造价值的领域。服务也被包括在产品工程中。为了获得更大的利用价值,制造商们必须时刻跟踪产品的使用情况,为此需要用到产品生命周期管理(PLM)理论。

在汽车制造业和航空航天工业领域中,一体化的PLM系统在实际生产中得到广泛推广

和应用。从产品开发直至企业经营和服务文件的管理,PLM系统是整个过程链中的所有数据和信息管理的平台。PLM系统还可以通过工作流程和交流功能的一体化,连接外部和内部的工程领域。

之前所提到的参考模型是以工厂的生命周期为导向的,描述了从战略规划直至维护的整个过程。原则上,工厂是可以借助专门的工具,使用PLM系统,辅助上述所有过程的。但是要求有目的地将产品管理和工厂管理严格区分开来。图10所示为产品和工厂生命周期的基本模型。

在一个工厂中,往往要生产各种各样的产品,批量有大有小,但是工厂的技术人员却总是要求达到最高的绩效,另外,不同构成要素的寿命长短不一,从几分钟(工具)到30年

(建筑厂房)的都有,这样的事实迫切要求我们在一个开放、宽广的系统领域内实现工具的高度多样化。对此,信息技术向我们提供了一个新颖的一体化系统方案。

2 数字化工厂仿真

在产品开发中,是根据设计的计划和给定的参数进行生产的。因此,也得对工厂机器和生产工具的制造进行过程仿真。

规划的主要任务就是在工厂的生命周期内调整现存的构成要素。调整涉及到现有的机器和生产工具。因此,必须要对它们实现数字化。数字化工具辅助的规划最后都要进行模拟仿真。图11描述了它们之间的关系。

工厂结构、资源和过程的更改方案和给定参数产生于工厂和过程规划部门。在这个部门中进行调整和不断优化。规划设计者需要获得关于产品开发、生产计划、批量、交货期和目前工厂运作情况的数据。工厂及其构成要素的状态是改进过程的基础,分为短期、中期和长期。对此,需要从工厂中“读取”目前要素配置和空间排列的情况。可以运用分析

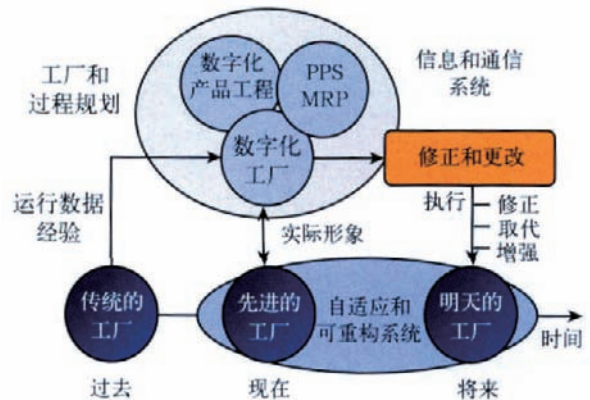


图11 数字化工厂和过程规划

工具,从过去的“最佳操作”、工序能力、加工时间、成本、干扰中获得相关经验。

工厂的调整应当按步骤进行。短期的工厂调整可以是:工作计划、生产方式、控制程序和装配操作的调

整。中期的改进涉及到制造原理、合理化,以及由加工任务引起的过程、机器和系统的更改。

由此可见,改进过程是由多个理论设计方案组成的。对于工厂的持

型的中央信息技术系统。因此,必须要追求灵活性高的、可以在很长的时间段内一步一步执行的方案。毋庸置疑,这种方法的前提条件是:数据结构和系统接口的标准化。

通过参考模型的各个工作领域,上述的方案包含了一个全局的工厂及其构成要素设计布局。可用的工具可以是西门子系统库/PLM或PTC,并且可以在网格中执行。由此,还要使用一些工厂控制、连接可移动物体(材料、工具、汽车)的系统,模拟和集成工厂运作系统。工厂数据管理系统是核心,其数据结构目前是其其他研究项目的课题。

生产培训和进修

德国制造业对工程师的需求在不断地上升,并且显然已经发展成为为了经济增长的障碍,是耗费成本的主要因素。一些大型公司开始在PLM系统的基础上致力于工具的完全一体化,然而机械制造和其他领域的工程公司却止步不前。毫无疑问,这是因为目前尚缺少在经济性方面强有力的相关成功实例,并且有些企业畏惧运用过程中潜在伴随的风险。同样,不可否认的是:一方面,目前市场上供应的系统具有一定的功能性,只有非常专业的专家才通晓这些功能,另一方面,这些功能又可以应用于系统工作的各个领域。工具的复杂性,数字化的高昂花费,以及对正确生产战略的追求,使得我们极度匮乏有技能的人才。

从长远的角度考虑,逐步采用和

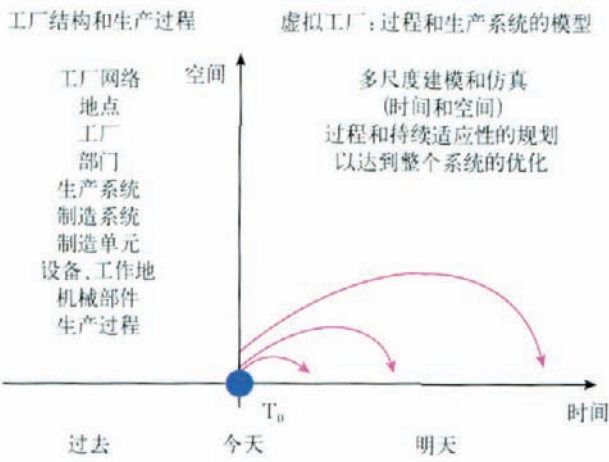


图12 生产系统的仿真

续运行来说,短期的运行要尽可能地得到“最新”信息的支持。

仿真技术中包含了大量的工具,利用这些工具可以在准备阶段分析和优化生产系统的动态特性(图12)。其单位可以是不同的时间和空间刻度,如:网络至过程,毫秒至中长期时间段。有些特殊的体系可以用来优化机械系统,乃至仿真空气体和能源流动。还有一些系统可以用来检测复杂系统的功能。

3 规划和工程过程的辅助工具

在执行过程中,要实现工厂及其构成要素之间的数字化耗资巨大,因此在机械制造中很少能找到集成系统。目前尚未有将“工厂”作为核心,工厂数据管理作为重点的一系列系统。此外,还缺少能够有效辅助前期战略和结构规划的工具,例如工厂的产能规划或投资规划。但是,具体的实施过程迫切要求分配开发任务,推进工厂和过程规划的开放平台,使得参与设计和改进生产的所有合作部门达到高度的同步性(图13)。

目前,实现所有工厂物体的数字化费用相当昂贵,不再是一个经济有效的方法。此外,众多公司也畏惧大

为了满足整体优化和局部改进方面的要求,工厂数据模型必须具有整体性的外观和内部结构化。此外,与前面所介绍的PLM系统相反,它还要对现有资源进行相当精确的模拟仿真。

4 网格制造工程

在工厂、过程规划部门和工厂经营管理中出现的经济结构分工需要一个信息化的技术厂房,它根据网格运算来开发。

1998年底出版的《网格:运算基础构架的新蓝图》一书中首次提到网格运算方法。网格中涉及到的是一种可以一体化地联合使用地理位置上无关的独立资源的基础构架。

我们在Fraunhofer自动化研究所建立了这种结构。该结构遵循前述的参考模型,并且运用网格运算方法,结合了各种不同的应用领域(图14)。

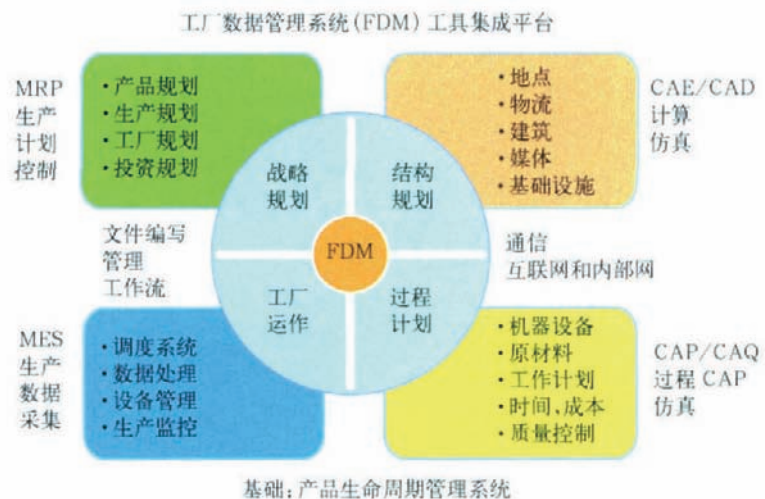


图13 各种工具及其集成

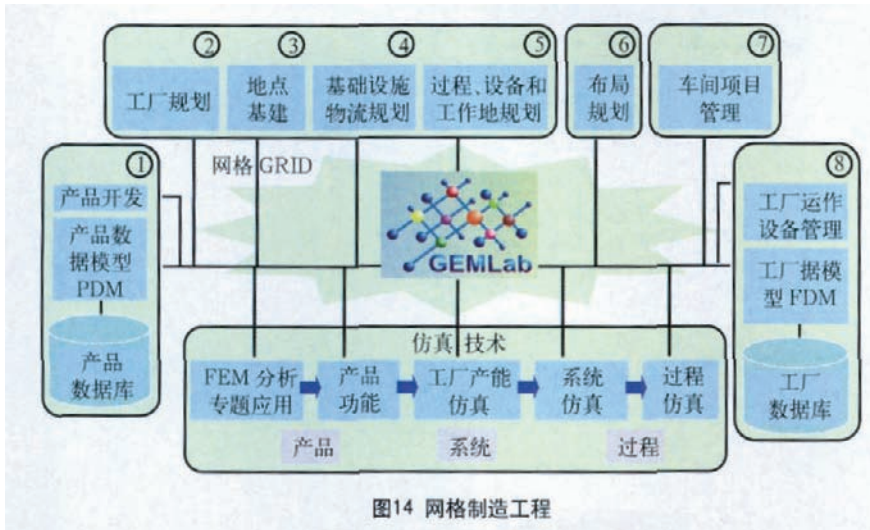


图14 网格制造工程

集成工厂数据管理平台是减小技术和经济风险的有效方法之一。下面将指出一些战略相关优点和经济性优点：

- (1) 避免错误开发；
- (2) 在投资时改进结构和过程时节省时间；
- (3) 激发合作同步性；
- (4) 降低研发和制造成本。

当技术说明中已经明确了客户应具备的结构和过程，并且对于产品的整个生命周期内都可以提供服务时，就可在报价阶段显示出主要的应用潜力。

在今后的几年内，不管是制造商与用户之间的关系、商业模式，还是规划过程的速度与精度，都会发生结构性的变革。对于整个制造工程领域，工程师和管理人员的能力仍然是一个很大的问题。

针对这个目的，斯图加特大学成立了一个制造工程研究生院(图15)。这所学院向来自企业经济学、信息技术、机械制造和电子技术的优秀毕业生提供攻读制造工程学博士学位的机会。博士生们还会接受到工厂和生产规划改进战略方面的培训，其重点在于工厂的可优化能力，同时还会对相关领域进行必要的深入和补充。我们的基本教学理念是：将机械制造、电子技术、信息技术和企业经济学，这些专业科目应用到未

来工厂的开发中去。

学院工作分为2部分，一方面提供在企业中参与课题和工作的机会，另一方面，博士生们可以参与研发项目。到目前为止，该学院已经录取了接近30名博士生。另外还剩30个名额可供申请。

这所研究生院培养出来的是专业顶尖人才，研究所内的学习型工厂对他们提供工业工程继续教育的机会。

“现代工业工程”的学习工厂由一个柔性化(模块化)的制造系统、装配系统、和数字化学习岛组成，数字化学习岛中具有所有数字化工厂中应该具备的工具。参与学习的人员在一个数字世界内学习工厂系统的开发与设计。他们也可以在实际

物质化的车间内对设计方案进行改进。数字化的系统可以勾勒出实际的轮廓。但是还需对优化能力作出技术创新，使得学员可以接受到先进的工具和尖端的技术方面的培训。

结束语

面对德国生产制造业严峻的经济条件压力，我们必须努力探索出提高竞争力的有效途径和方法。在竞争无比激烈的市场中，一个成功的战略就是：工厂配置结构化。这样可以将工厂变成可优化的、可不断调整改进的复杂系统，尽管要对之进行不断的改进，但是还是可以带来很高的绩效。针对这个目的，必须要使整个流程系统化，从战略规划至运行，乃至改建，这一系列的过程都要系统化、合理化。

在各个过程中要运用数字化的工具，并且通过工厂数据管理平台使它们长期保持一体化。制造工程实验室起着领导作用，其基础是网格运算技术，并遵循结构化的流程。

为了辅助制造工程人员的技能培训，我们还在斯图加特大学建立了具有最尖端技术的学习工厂和研究生院。本文首次提出了这样一个整体设计方案。

(张曙 编译)
(责编 依然)

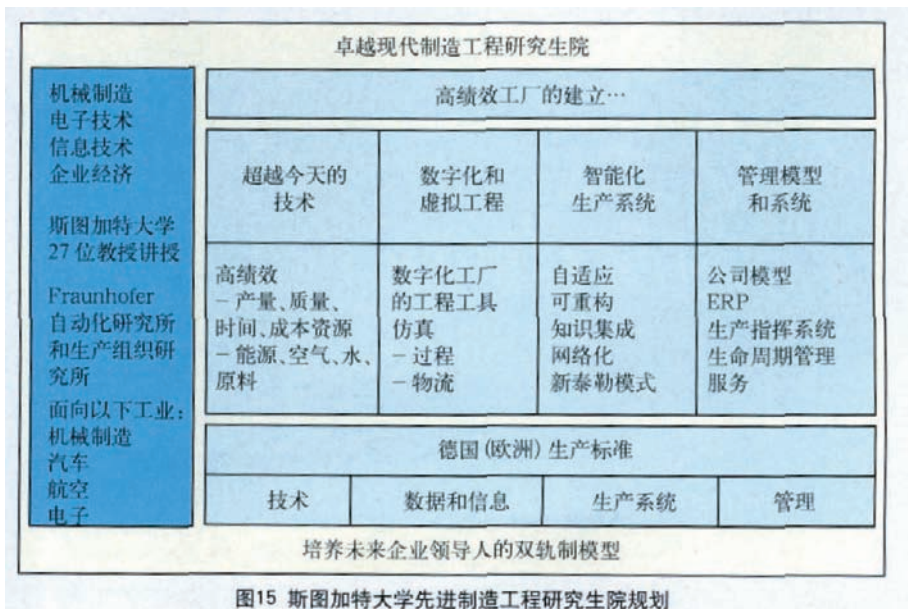


图15 斯图加特大学先进制造工程研究生院规划