



精益制造和飞机移动式装配线

Lean Manufacturing and Aircraft Mobile Assembly Line

金航数码科技有限责任公司 陈绍文 王 舸 孙珞珈



陈绍文

金航数码科技有限责任公司高级顾问, 长期致力于航空制造企业自主信息化软件系统的研究、开发和实施推广。对航空航天制造企业的生产改进和流程再造有近 20 年经验。研究方向包括精益制造、ERP、MES、数字化制造、航空企业信息化规划方法论等。

基于精益思想的飞机移动式装配线已成为飞机生产新模式, 世界各大航空制造企业竞相采用。飞机移动式装配线既是长期精益实践的成果, 又对整个航空制造供应链起着积极的推动作用。适时地启动飞机移动装配技术研究, 在航空制造中深入推行精益生产的理念、方法和文化是中国飞机制造向世界水平迈进的必由之路。

基于精益思想的飞机移动式装配线已成为飞机生产新模式, 世界各大航空制造企业竞相采用。飞机移动式装配线既是长期精益实践的成果, 又对整个航空制造供应链起着积极的推动作用。适时地启动飞机移动装配技术研究, 在航空制造中深入推行精益生产的理念、方法和文化是中国飞机制造向世界水平迈进的必由之路。

飞机移动生产线的需求

二战期间的 1940 年, 美国政府下令福特汽车公司制造 1200 架 B24 轰炸机。福特经历了一次次挫折以后, 由当初 T 型车生产线的建造者出任 B24 装配线的设计师。他完全照搬了汽车生产的模式, 建成了 1 英里长的 L 型装配线, 共设 28 个站位, 每小时出产 1 架飞机。至二战结束, 共

装配 8600 架 B24, 成为美国历史上产量最多的飞机。大量生产飞机之所以成功是因为当时战争消耗引发的大量需求。另外, 当时的飞机相对简单, 加上战争条件下, 较少有客户化和构型变化要求, 使 B24 飞机制造具备了大批量生产的条件。

但是, 现代的飞机生产环境发生了变化。因为飞机技术复杂化, 总装涉及的专业多、工种多、人员多、物料多、工具工装型架多、技术文件多, 总装过程组织困难。加上社会和经济形势不稳定, 无论是民机还是军机, 都具有需求多变、构型多、相同构型产量少的特点, 加大了飞机生产装备投入的风险。因此传统上飞机总装一般采用机库式(或停车场式)装配。

机库式装配由多组工人并行作业, 各架飞机的实际装配作业很难一致, 难以保证质量, 弊病很多。因此飞机制造业产生了强烈的改进装配方式的需求。最先出现的是由机库式向站点式过渡: 设置多站位, 在每个站位上装入一部分, 由通用设备移动飞机到下一个站点, 直至完成。飞机在站式式装配中是一站一站地移动的, 工人也有了比较合理的分组和分工, 但是装配工作地的混乱局面并没能有本质的改观, 受供应链的影响也没有得到彻底的扭转。

移动装配线是第一次管理革命的产物, 福特汽车的移动装配线成为工业化的标志之一。移动装配线的基本要素是: 零组件统一标准的互换性、工人精细分工、动作标准化工作, 物料的精确到位、均衡和节拍, 采用专用的固定生产线设施。这种装配方式效率高, 但专用设施投资大, 缺少柔性受产品变化影响大, 传统上只用于批量较大、产品结构简单的产品。而飞机是典型的长周期、小批量生产的产品, 装配技术又复杂, 实行单架次构型管理, 造成了飞机移动装配线在技术上、管理上、物流配送、投

资大, 都有难点。怎样将大批量生产简单产品的流水线装配方式用在小批量复杂的飞机装配中? 采用精益生产方式就是可行的解决方案。

现代飞机移动装配线

第一条现代的飞机移动装配线是波音 717 总装线。当时认为波音 717 是性能很好的支线客机, 预测在 20 年内有 3000 架的市场预期。这使得波音 717 具备采用移动式装配的需求, 并于 2006 年初建成投产。这条单件流、连续移动式装配线共有 2 个用于机体对接的固定站位和 6 个总装的移动站位。移动式飞机装配的直接效益是将原来需要 20 架在制飞机减少到 8~10 架, 并缩短装配周期 50%。在支线客机制造商庞巴迪与巴西航空的竞争下, 波音 717 被迫于 2006 年 5 月停产, 717 飞机共生产了 156 架。移动装配线运行了很短的时间。但是, 移动装配线的成功成为波音 717 的重要历史遗产。

与 717 同时期建设的是武装直升飞机 Apache 的精益脉动装配线。从 1998 年到 2008 年的 10 年间, 波音不断改进这条装配线, 从直线形发展为 U 型, 最后是 J 型; 站位数从 10 变为 15 再回到 10, 终于获得了减少装配工时 85% 的示范性的效果。2005 年 Apache 的 U 型精益脉动装配线被授予美国精益生产的最高成就奖——新乡奖。波音在这些成就的鼓励下, 将移动式装配用到了它的所有商用飞机, 波音 737、波音 747(部装)、波音 757、波音 767、波音 777 上。其中, 1998 年进行首次 737 机身结构移动式装配的原理认证, 使用完全配套、向工作点配送和看板等方法, 缩短生产周期 80%。波音 737 的总装移动线缩短总装配周期 46%。美国精益航空创新计划(LAI)称 737 移动线是“精益和高效率生产的模范”。777 的 U 型移动线从 2006 年开始建设, 采用逐步的让每个装配阶段“具

备移动能力”的方式, 于 2010 年 1 月实现全线同步移动, 标志着全部建成。它被确认为世界最大的集成式移动装配线。正在试生产的 787 梦幻机, 也建立了移动装配线。波音的 P8A 反潜电子侦察机预期总产量也就在 100~200 架之间, 也采用了移动总装配线生产。最引人瞩目的是 2008 年 8 月波音宣布, 它开通了有 13 个站位的卫星精益脉动装配线生产。在新的精益脉动生产线上生产的第一颗卫星是为美国空军制造的 GPS 系统的 IIF 卫星。波音今后所有的卫星生产都将采用新的方法(当时卫星的订货量为 12 颗)。

波音冲破了传统的多品种小批量飞机生产不能采用移动式生产线的禁锢, 它的成功经验带动了世界各大飞机制造商。空客、庞巴迪、巴西航空都为新机建立移动或脉动装配线。英宇航(BAE)承担着 F35 生产的大约 1/3 的工作量, BAE 通过价值流分析, 缩短了装配过程, 实行单件流布置的移动生产线。英宇航建立了按架次成对移动的空客机翼总装脉动线和支持车间, 达到日产 1 架的目标。更值得注意的是, 就连从事发动机维修的德国汉莎航空也于 2010 年建成用于 CFM 发动机维修的发动机的脉动的生产线。移动装配线正在被航空航天制造业所普遍采用。

新飞机生产模式的诞生

在航空和军工的多品种小批量生产中, 使用精益生产的装配方式成为一个新的趋势。移动式装配线成为飞机生产乃至军工生产的新模式。精益的移动式装配成为一种先进的制造和管理技术。甚至成为航空生产系统先进性的标志。和汽车生产的流水线方式相同, 飞机移动式装配已经成为飞机生产的“标准”模式。之所以将移动式装配作为一种新的飞机生产模式, 是因为该模式能产生



以下效果:

- 效率高,缩短了周期和装配工时;
- 缩小了飞机总装厂房所占用的面积,并且减少了飞机生产中的投资;
- 改善了装配工作地的环境,使作业标准化,更易保证质量和生产安全;
- 对整个企业和整个飞机生产供应链起着规范和拉动作用;
- 在建立移动线中采用的新工艺方法和新装备技术,促进了飞机装配技术的发展。

移动式装配线是一个单件流过程,要求连续的物流供给。总装配的移动节拍将拉动整个企业和供应链的生产步伐。生产计划管理由装配拉动,实现整个供应链的拉式生产,并严格与总装配节拍同步。实现飞机移动装配将彻底颠覆传统的企业运行的理念、状态及文化。

精益思想是移动装配线的灵魂

波音在总结移动装配线成功的因素时,总是提到是波音十几年来致力于实行精益生产的成果。精益生产是成功建立飞机移动装配线的基础,移动装配线的运行又是对整个

波音生产模式的巨大推进。波音从在建立波音 717 移动线时开始,就强调了实行精益制造的 3 个基本原则:客户同步节拍生产、单件流和拉式生产。

波音还认为构建移动装配线的最大挑战是从传统的推式计划管理向精益的拉式计划管理模式的转变。因此,波音特别关注几个成熟的精益生产的方法:(1)生产线的均衡性;(2)工作过程标准化;(3)现场可视化控制;(4)零件和工具派送到使用点;(5)建立供给线。

波音在所有涉及到飞机移动式装配线的成功案例时,例如介绍他们的 Apache 武装直升机脉动装配线时,都将波音长期推行精益生产方式的成功和企业精益文化的积累作为首要因素。与之同步,实现移动式装配又是对精益制造的深化。波音称:通过移动装配线,波音的精益旅程从“摘低枝果子”向纵深的整个企业同步节拍生产推进。

建立精益飞机移动装配线的规划

波音移动装配线的建造过程其实就是一个深化精益生产的实施过程,几乎包括了运用精益生产所有方法。波音 737/757 移动装配线的建

造过程有 9 个步骤:

(1)分析价值流图 Value Stream Mapping (VSM)。价值流图分析是建立移动装配线的总体设计。在建立移动装配线之初,波音首先绘制飞机总装的现行价值流图,通过分析,消除浪费,并将装配过程的改进纳入,设计出新的价值流图。价值流图 VSM 是国外应用最广的价值流和办公室流程分析和重建的方法,它以简单、直观、半量化的分析和无限的扩展能力,在广大企业中实地应用,VSM 也是精益企业的基本功。

(2)平衡生产线。按站位、天和班次进行生产线的平衡。从主生产计划 MPS 开始,做到多机种的均衡交付,企业内部和外部供应链的均衡生产。

(3)标准化工作。规范飞机装配每一项作业,乃至动作、时间。没有标准化工作就没有生产的节拍,没有节拍就没有建立移动式装配线的基础。

(4)工作地可视化。由于移动装配线是在车间里移动的,工作地区块线条的可视化就格外重要。车间地面的区划不仅规范了物料存放的位置,还是飞机首尾相接列队移动、供料和补给路线的“交通标志”,成为移动装配线的组成部分之一。现场的双面显示屏或安灯、灯箱,警告消息,同时面向装配线和支持车间。

协同的管理信息系统也是不可或缺的,系统实时地对加工或库房的拉动需求、零组件配套需求。作业工人的个性化门户提供作业指导书的无纸化显示、装配过程数据采集、线上每架机的装配进度需求等。

(5)完全配套。完全配套是指指定飞机架次、在各个装配站位(或者装配指令、工序)所需要的物料、工具工装、辅料以及消耗材料一起按照装配顺序摆放在配送箱或配送板上,待需要时一次送上。在移动式装配线上,不允许零件、工具、辅料的分

别配送。

(6) 建立配送线。配送线将准备好的完全成套件,按指定的架次、在指定的时间、按照规定的路线送到指定的地点。

(7) 突破原有流程,重新设计主装配过程。流程的改进和价值流图分析是反复循环进行的。在进行装配线的未来状态设计时,必须有装配过程的改进,才能到达各站位节拍一致,实现同步移动的效果。重新设计装配过程才能大幅度的减少装配周期。在波音 737 建立移动装配线时所创造了“座椅提升机”等新的工装和作业方式。

(8) 形成过渡的“脉动生产线”。移动装配线的有 2 种移动方式:连续移动和脉动。从机械构造观点,脉动线和连续线各有繁简。从管理角度看,采用连续移动还是脉动不仅是生产效率问题,更重要的是管理水平的适应性问题。脉动和连续移动的差异之一是:脉动可以设定非增值的缓冲时间,当生产管理跟不上时,留有一定的间歇等待。发现问题未处理完则不移动,或者留给下一个站位去完成。随着后援的成熟,逐步将脉动节拍加快。可以将脉动式作为一种过渡形式。连续移动和脉动另一个重要差异是直觉的震撼效应不同。移动装配线上首尾相接飞机的移动,让所有在现场的人都直接感觉到移动线承载着整个生产过程的震撼感。工人能够真正的看到和感觉到生产的节拍。工厂中所有的人都随着移动线的节拍不懈怠的工作。

从精益的观点,脉动线作为阶段目标,移动线是最终目标。国外主要飞机制造商对于连续移动和脉动的选择,仍旧在预期产量较大的机型上采用移动式总装配生产线。

(9) 形成总装配的移动生产线。最后在全部具备了移动条件后,开动连续移动装配线的作业。

在建立移动装配线时,配套和配

送是移动的必要条件,起着关键作用。要求是将作业指导书、零件、工具、工作指令都用工具箱配送到装配工人近旁,消除了工人到处找工具材料文件的时间消耗。装配线近旁设置了“月光车间”(生产准备/紧急支援),包括快速响应的零件返修车间、紧急设备维修、临时工装制造、配套和配送基础设施等。

移动装配过程消除了大量的非增值作业,产品在整个装配线的移动过程中每个时刻都是增值的,最大化地减少了装配工时和成本。

移动装配线的完整性

按照国外的经验,一条成功的飞机移动装配线总是具备 5 个部分组成:

- 移动线主体: 站位设施,对定位的设备,拖动装置、可移动的装配架等;
- 供给线: 配套和配送的物流系统;
- 现场可视化系统;
- 后援的支持车间;
- 与 ERP 和 MES 系统融合的信息系统和装配线上的固定及移动终端。

从管理的角度说,飞机上线后不中途下台,下线后不返修,是移动装配线成功的主要标志。移动线开通之初,出现中途的缺件、质量、后援问题,需要应急处理,几乎是必然的。可以延迟移动、也可以停滞一会,但所有问题必须在线上解决,这是一个强迫推进的机制。后援的支持车间(波音称为“月光车间”)用来紧急应对这些问题。因为各种原因将飞机撤下来,就说明管理达不到移动生产线的要求,并且为所有不协调和不精益开放了绿灯,失去了移动线拉动生产和供应链的作用。

装配线的专业制造 厂商应运而生

世界各大飞机制造商纷纷建立

移动装配线,采用装配自动化设备,催生了一批专业飞机装配工装和生产线的制造厂商,以及移动式装配线的集成管理软件系统,为世界各大飞机制造厂服务。其中 1992 年成立的 AIT 迅速发展成为世界级的专业飞机装配设备的制造厂商。它为各大航空企业设计和提供自动钻铆设备、飞机对接装配设备、激光测量设备、自动导引车系统、移动式装配线。AIT 为世界各国包括波音、洛克希德·马丁、庞巴迪、空客法国、空客西班牙、巴西等航空制造商制造各种大小和批量的飞机建造总装线,其中为庞巴迪制造的自动化总装线获得美国先进制造奖。

飞机生产装备和移动装配线的专业制造厂商的出现,标志着原来各个飞机企业一家一户的自造自用的飞机工装制造模式的改变。建立标准化、规模化、技术先进,并且具有丰富飞机装备制造经验的专业厂商是提高整个国家的飞机制造水平和加速飞机研制过程的主要举措,这也是航空生产精益供应链的组成部分之一。

结束语

世界各国飞机生产向移动式装配发展的趋势对我国的航空工业来说是一次严峻的挑战。推广移动装配线不应仅着眼于缩短制造周期和降低成本,更重要的是拉动整个航空制造行业管理的进步。适时研究国外飞机移动装配技术,在航空工业系统中更深入的推行精益生产的理念、方法和文化是中国飞机制造向生产世界水平迈进的契机。同时需要进行反思并打破传统的管理思想,研究在其他领域,包括仪表和航电系统、飞机附件、发动机装配中采用移动式装配线的可行性,通过建设移动装配线提升飞机制造技术、生产管理和供应链管理的水平和效果。

(责编 良辰)