

航空发动机装配工艺精益化改进方法及实践

Lean Improvement Methods and Practices for Aero Engine Assembly Process

■ 王明军 / 中国人民解放军93170部队 宋宝鑫 丁翠豪 宋树林 王科 / 中国航发动动力股份有限公司

航空发动机装配工艺是影响装配质量和效率的重要因素，是指导装配操作、规范操作标准和保证质量一致性的重要保障，工艺改进是以现有工艺为基础，面向未来技术发展方向而采取的提升举措。

精益生产是美国麻省理工学院国际汽车计划组织（IMVP）的数位专家对日本丰田公司准时化生产（JIT）的赞誉性定义，精益生产方式的优越性不仅体现在生产制造系统，同样也体现在产品开发、协作配套、营销网络以及经营管理等各个方面，是当前工业界最佳的生产组织体系和方式之一。工艺工作是科学技术转变为生产力的实践过程，科学技术转化为生产力，一定要通过工艺技术、工艺装备、工人的操作技能，以及包括工艺管理在内的工艺工作来实现。航空发动机装配工艺精益化是对工艺路线的优化改进，是基于装配实际生产过程的精益改进，旨在发现生产作业的不平衡、作业等待等问题，通过改进工艺路线，最大程度消除这些生产浪费现象，从而提高发动机装配效率。

工艺精益化与工艺改进方法

工艺精益化主要解决由于工艺策划问题导致产品制造中存在的等待周期浪费问题，工艺改进主要解决产品制造质量、制造效率和作业强度等问题，工艺精益化改进同时包含这两方面的改进，首先进行工艺改进，再进行工艺精益化。

工艺改进

工艺改进的目的是建立一种持续、即时改进的工艺工作机制，能够调动广大工艺工作人员的创新力，逐步提升产品质量、提高加工效率、降低制造成本。工艺改进的主要对象为质量不稳定及废品损失较大的产品、影响交付的产品、工艺研究或新工艺引入带来的新工艺、影响产品中转质量及周期的工艺问题等。

工艺改进关注工艺方法的改进与创新，主要包含工艺方法改进、工艺方法创新、工装设备改进、工装设备创新等，目的是降低作业强度，标准化作业方法，使产品质量最稳定。

工艺精益化

工艺精益化是应用精益思想优化工艺流程，实现质量、时间和生产成本最优的一种方法。以精益思想为指导开展工艺工作，优化、标准化工艺流程，形成规范性文档。

工艺精益化一般从产品家族的角度归纳出典型工艺，应用精益思想有计划地对工艺系统进行定期优化。工艺精益化有助于消除不增值的操作和浪费，取消或调整不合理工序，简化工装、夹具，减少或消除生产准备时间，改进质量问题等。

工艺精益化关注工艺路线的精

益性，通过取消、合并、重排和简化（E CRS）等手段对现有工艺的路线（工序顺序）进行优化改进，目的是减少作业工序、减少作业浪费，使作业周期最短。

取消：首先考虑该项工作有无取消的可能性，如果所研究的工作、工序、操作可以取消而又不影响产品的质量 and 组装进度，这便是最有效效果的改善。**合并**：合并就是将两个或两个以上的对象变成一个，如工序或工作的合并、工具的合并等，合并后可以有效地消除重复现象，能取得较大的效果。**重排**：重排也称为替换，就是通过改变工作程序，使工作的先后顺序重新组合，以达到改善工作的目的。**简化**：经过取消、合并、重组之后，再对该项工作进行更深入的分析研究，使现行方法尽量地简化，以最大限度地缩短作业时间，提高工作效率。

工艺精益化改进流程

一是成立改进团队。以工艺工程师、质量工程师等工程技术人员为主，操作人员、生产人员等拓展人员共同参与，组成工艺精益化改进多功能团队（一般8~10人），如图1所示。

二是掌控改进核心。关注客户的质量、成本、周期等指标需求，

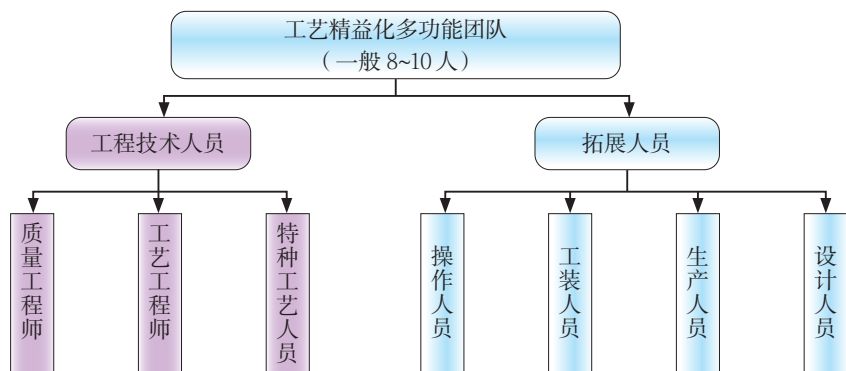


图1 工艺精益化改进多功能团队

从根源上杜绝不合格品的产生。

三是统一改进思路。使装配工序数量最少，装配过程浪费最少，装配周期最短，装配质量最稳定。

四是确定改进对象。优先选择产品族典型工艺、影响交付的关键零部件、年产量大且加工周期长的产品。

五是开展工艺改进。针对确定的改进对象，开展装配工艺方法的创新、改进，当无法进一步提升改进时，开展工艺标准化、模块化工作。

六是开展工艺精益化。在改进对象完成工艺改进后，开展工艺精益化，利用价值流图分析等精益工具，定位工艺路线中存在的浪费，针对性地制定改进措施。

工艺精益化改进实践案例

一型发动机低压涡轮部件的装配工序

较多、装配周期较长，是影响该型发动机部件装配周期的瓶颈问题，可以作为改进对象开展工艺精益化改进。

装配现状

低压涡轮部件装配周期64h，其中增值作业周期为32h，等待周期为32h。经调查，装配工艺规程和装配工艺路线存在较多作业强度大和停工等待问题，有较大的改进空间。

改进策划

第一步：工艺改进。技术人员和班组长对低压涡轮部件结构、装配工艺方法和工装设备进行分析，找出作业强度大、耗时长长的工序，研究改进的可能性和改进措施，必要时开展攻关。

第二步：工艺精益化。技术人员、班组长和生产管理人员对工艺路线进行分析，找出存在等待等浪费的工序，研究改进的可能性和改进措

施，必要时升级问题。

部件结构分析

低压涡轮部件主要由一级盘片、低压二级导向叶片、二级盘片、5支点轴承、5支点轴承轴端螺母、4支点轴承、4支点轴承轴端螺母组成。在部件状态下，低压涡轮二级导向叶片无径向、轴向定位支撑，在装配过程中及交付时均需要采用定位措施将其定位。在低压涡轮平衡时，也不需要装配二级导向叶片，否则平衡工装设计会非常复杂。

装配工艺路线分析

部件集件状态：低压涡轮二级导向叶片、4支点轴承及轴端螺母、5支点轴承及轴端螺母散件集件，其余零件装配在一起集件。

根据部件集件状态，策划了装配工艺路线，总体思路为：首先进行动平衡，然后安装轴承和轴端螺母，最后安装二级导向叶片。在动平衡前还需装配安装平衡轴套及轴承；在二级导向叶片安装前需要先分解二级叶片，详细的工艺路线共包含装配工序12个，如图2所示。

装配工艺瓶颈点分析

二级导向叶片定位方法不合适：低压二级导向叶片采用吊车吊装的定位方式，存在轴向、径向晃动等问题，容易与篦齿、叶片等其他部件产生磕碰，且需要长时间占用吊



图2 低压涡轮转子现行装配工艺路线

车资源（工序10—12），装配操作场地也非常受约束，必须在吊车下作业。

后挡板连接螺栓的防松锁片安装方法不合适：后挡板装配时，需要用螺栓32件连接固定，螺栓用T形锁片锁紧，在螺栓拧紧过程中需要止动T形锁片。现工艺采用一字螺丝刀逐个抵住锁片定位爪进行止动，存在螺丝刀易脱出、止动效果不一致、操作强度大等多项问题，装配效率和质量堪忧。

装配工艺改进

二级导向叶片定位方法改进：改进二级导向叶片定位方法，设计专用定位工装取代吊车吊装方法，将定位工装安装到装配车上，从下方支撑二级导向叶片，并设计轴向、径向位置调整结构，确保二级导向叶片处于最佳装配位置。

后挡板连接螺栓的防松锁片安装方法改进：轻量化设计整环式快速锁片定位工装，将所有锁片的定位爪一次性全部定位。具体操作方法为：首先从后挡板内圈花边处安装至安装边前端，然后旋转半个花边齿，最后通过调整轴向螺钉将工定向后顶起至与安装边贴合，这时所有锁片的定位爪就进入了止动槽内。

装配工艺路线现状分析

运用价值流分析精益工具，调查装配工艺路线存在的主要浪费问题。收集装配过程相关作业期量，统计增值、生产准备、等待等工作的周期，绘制现状价值流图，发现在装配过程中存在螺母修磨等待、平衡轴套加温及恢复室温等待等较多浪费，如图3所示。

装配工艺路线精益化

根据价值流分析结果，以工艺精益化ECRS为手段，制定精益改进

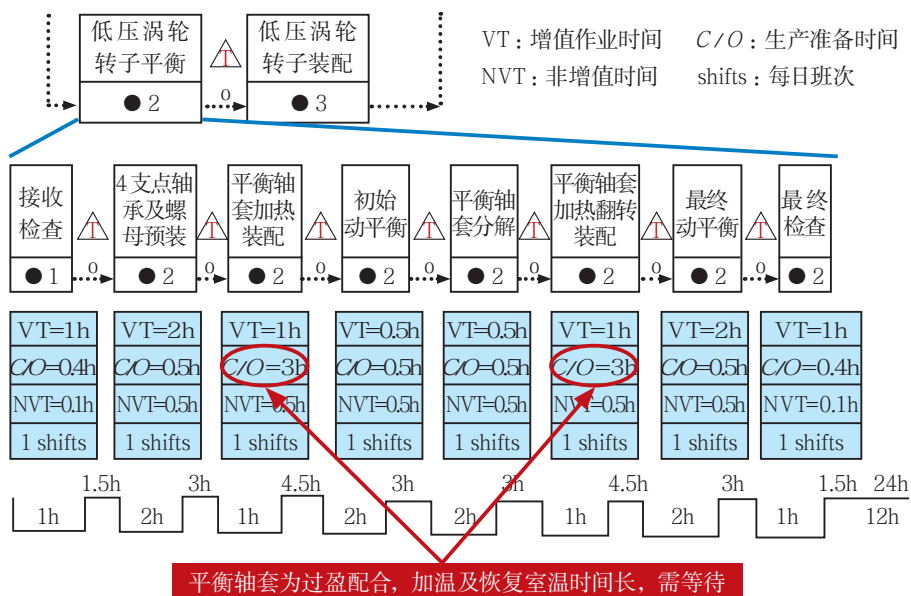


图3 低压涡轮转子平衡价值流分析

方案。

一是工序取消。研究新结构平衡轴套，取消加温装配轴套工序，消除等待浪费。原结构平衡轴套利用低压涡轮轴前轴颈外花键传扭，轴套为过盈配合，故安装前需要加温、安装后需要恢复室温；现改进利用低压涡轮轴前端端面槽传扭，轴套为间隙配合，无需加温即可完成装配，故可消除加温及恢复室温等待时间，如图4所示。

二是工序合并。4支点螺母修磨工序、5支点螺母修磨工序合并，将等待次数2次减少至1次。原工艺要

求4支点螺母完成修磨及复装后才能进行5支点螺母的装配，原因为4支点螺母修磨期间，4支点轴承处于无压紧状态，翻转低压涡轮部件装配5支点螺母时，可能导致4支点轴承脱落；现通过增加4支点、5支点工艺螺母，可以解决4支点轴承临时压紧问题，故可以一次性将4支点、5支点螺母均发出修磨，如图5所示。

三是工序重排。4支点螺母修磨工序、5支点螺母修磨工序与动平衡工序并行，进一步消除等待浪费。原工艺要求低压涡轮部件动平衡完成后，才能进行4支点螺母、5支点

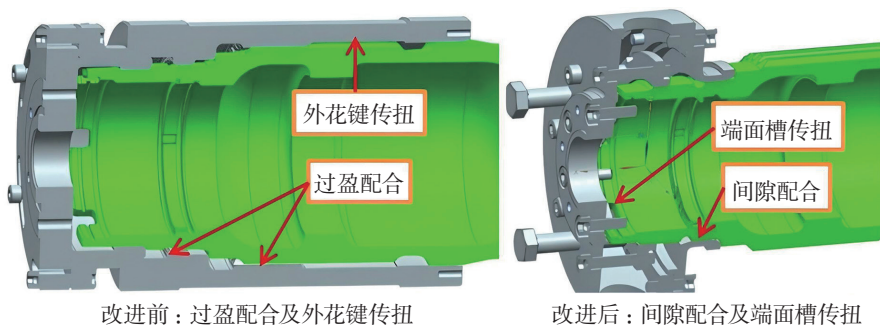


图4 平衡轴套结构改进示意

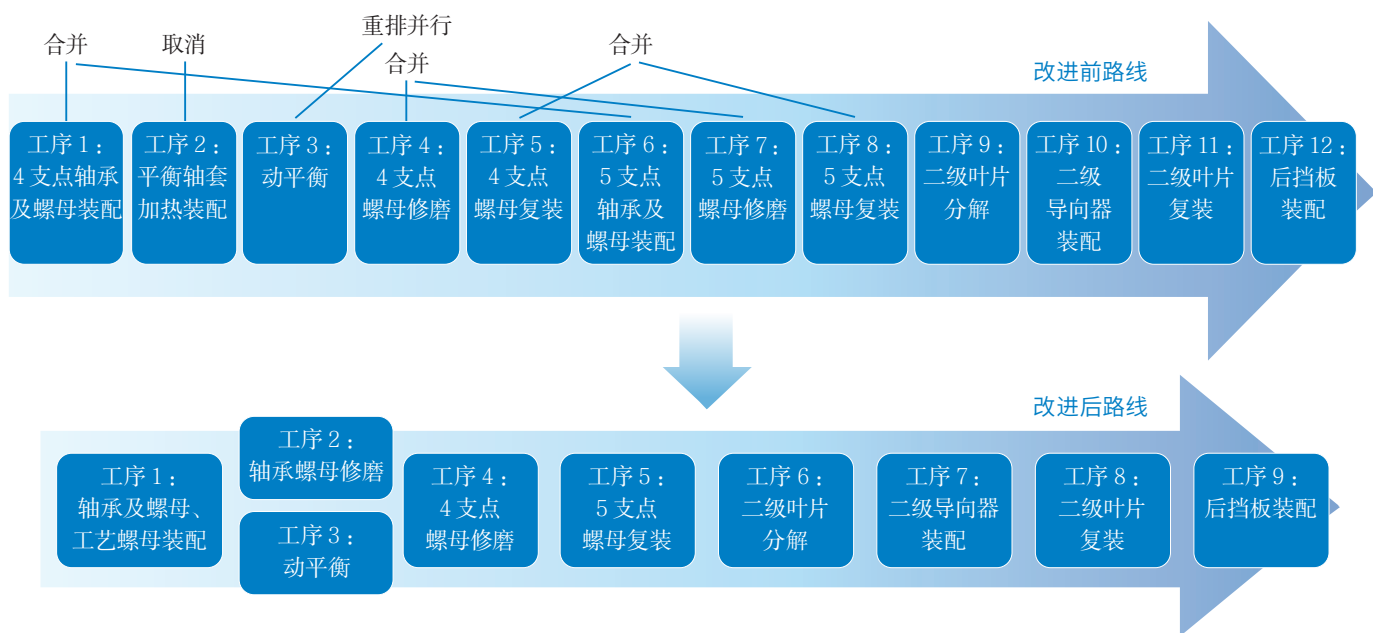


图5 低压涡轮装配、平衡工艺精益化改进

螺母装配及修磨工作。现通过4支点工艺螺母临时压紧4支点轴承后，即可进行动平衡，在此期间可以把轴承螺母发出修磨，实现平行作业，如图5所示。

通过上述分析，确定了影响价值产生的主要因素，并运用工艺精益化工具完成了精益改进，消除了装配流程中存在的主要浪费。

实施成效

装配周期方面，经过改进后，低压涡轮转子部件的装配周期大幅缩短，原装配、平衡周期平均为64h，现缩短为32h，装配效率提升了50%。

装配质量方面，经过改进后，低压涡轮转子部件二级导向叶片、后挡板锁片等工序的装配质量得到有效改进，杜绝了蜂窝磕碰划伤、锁片变形等质量问题。

作业强度方面，经过改进后，解决了低压涡轮转子部件的平衡轴套加热装配、二级导向叶片吊装人

工控制晃动、后挡板锁片无定位逐个止动等作业强度大问题，操作者的作业强度大幅减轻，很好地满足了人体工程学需求。

经验总结

工艺改进方面

工艺改进是装配工艺提升和面向未来装配技术发展方向的关键手段和首要工作。对现有工艺的掌握程度、现有工艺的技术瓶颈认识度、对未来技术发展的理解度、对改进措施的风险评估度等是开展工艺改进工作的思路，是保证改进成效的必经之路。

工艺精益化方面

精益的核心思想就是要发现和消除过程浪费，提高生产效率，做到准时化生产。为实现发动机装配工艺的精益化，就必须理解精益的核心思想，掌握并熟练应用精益工具，认真仔细进行生产流程调查、收集装配过程相关数据，从而能有

效发现浪费点，针对性地制定改进措施。

人员精益思想方面

加深技术人员对精益思想精髓的理解，使精益思想作为技术人员工作的基本准则，从而使精益思想得到更为广泛的应用，如产线规划、厂房规划、生产全流程改进等。

结束语

工艺精益化改进是中国航发运营管理体系（AEOS）和精益思想的重要内容，是生产线精益改善的基础支撑条件，是生产线流程提效和质量提升的重要措施。通过开展装配工艺精益化改进，可以在促进生产线改善的同时，有效锻炼装配工艺人员、装配操作人员以及装配管理人员的业务能力，加速AEOS和精益思想的落地实施。

航空动力

（王明军，中国人民解放军93170部队，助理工程师，主要从事航空发动机装配维修过程质量管理）