

引文格式: 龙安林, 何凤涛, 蒋超, 等. 飞机大部件装配能力测算方法研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 83-86, 102.

LONG Anlin, HE Fengtao, JIANG Chao, et al. Research on evaluating method of assembly capacity of large aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 83-86, 102.

飞机大部件装配能力测算方法研究

龙安林, 何凤涛, 蒋超, 陈爱民, 刘大鹏

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 针对具有典型离散型制造特征的飞机大部件结构装配能力测算问题, 以其下级部段件为研究单位, 分析了部段装配能力随工艺方案、操作熟练度、倒班模式、制造资源以及一般能力社会化等因素的动态变化关系, 提出了基于部段装配能力数据集并综合考虑飞机装配流程时序关系以及各部段装配能力匹配关系的飞机大部件实际装配能力测算方法, 通过举例计算, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 大部件; 装配能力; 离散制造; 动态; 飞机

Research on Evaluating Method of Assembly Capacity of Large Aircraft Component

LONG Anlin, HE Fengtao, JIANG Chao, CHEN Aimin, LIU Dapeng

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] In order to evaluate the assembly capacity of large aircraft component which has typical characteristics of the discrete manufacturing, the sub-components are selected as research objects. Dynamic effects of the factors including process scheme, operational proficiency, work shift model, manufacturing resource and main manufacturer-supplier model on sub-components assembly capacity have been analyzed in advance. Based on the data set of sub-components assembly capacity, the evaluating method of actual assembly capacity of large aircraft component has been proposed. Sequential relationship of assembly process and matched degree of each sub-components assembly capacity are taken into consideration. That method is proven to be feasible and effective via an assembly demonstration.

Keywords: Large component; Assembly capacity; Discrete manufacturing; Dynamic; Aircraft

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.083

飞机制造是一个庞大、复杂的离散型制造工程, 从工艺设计开始, 主要经历毛坯制造、零件加工、部件装配、总装配(安装)以及试验试飞等阶段。其中, 飞机部件装配和总装配是多学科交叉的高难度、综合性工作, 工作量约占整个飞机制造工作量的 30%~45%, 装配周期一般占飞机总制造周期的 40% 以上^[1]。飞机的装配能力直接决定了飞机的生产制造能力。

飞机装配属于典型的离散型生产, 装配能力的测算工作复杂性高, 操作困难^[2]。制造资源的投入是影响飞机装配能力的最主要因素。同时, 人、机、料、法、环紧密联系, 影响飞机的装配质量, 零标件供应、成品配套以及现场故障等使得飞机装配能力具有明显的动态特性。理论分析中常用 Petri 网建模方法建立生产线模型并进行瓶颈环节分析、优化^[3], 或借助计算机以 Plant

Simulation 等软件进行装配生产线仿真^[4], 也可以采用二者相结合的方式^[5]。文献 [3-5] 运用上述方法依次对某型飞机总装、某型飞机机身装配以及某型飞机机翼装配生产线进行了建模分析, 验证了方法的有效性和可行性。

飞机部件装配主要完成飞机结构件的定位、连接工作, 其涉及的零标件多, 协调关系复杂且结构刚性较弱, 实现了飞机从零件到组件、段件、部件直至机身/机翼大部件的结构演变。因此, 飞机部件装配流程长, 层级多, 前述文献中的建模分析方法在实际工程应用中略显繁琐。

本文为测算飞机大部件装配能力, 以部段件为基本研究对象, 分析主要矛盾, 重点关注部段件架内装配型架的数量和占架时间, 化繁为简, 从实际生产数据出发, 考虑部段件装配能力在工艺方案、操作熟练度、倒班模

式、制造资源以及一般能力社会化等因素影响下随时间的动态变化关系,结合飞机装配时序关系获得机身/机翼大部件的装配能力,用于指导工程实践。

1 装配能力影响因素

装配能力定义为单位时间内完成装配的部件数量,可表示为:

$$C = \frac{Q}{T} \quad (1)$$

其中, Q 为装配产量(架); T 为完成时间(年); C 为装配能力(架/年)。影响飞机部件装配能力的因素很多,其中可控因素主要包括工艺方案、操作熟练度、倒班模式、制造资源(型架、设备)以及一般能力社会化(主制造商-供应商模式)等;不可控因素主要包括现场故障、零件与成品配套缺件等。本文主要考虑上述可控因素对装配能力的影响。

1.1 装配工艺方案

工艺方案明确了工艺分离面、装配流程、装配基准、协调关系、部件姿态等重要内容,对装配能力的影响最为深远。工艺分离面直接决定了飞机装配的并行程度,分离面越多,并行程度越高,占架周期越短,装配能力越强。F35 战机生产能够实现快速上量,很大程度上得益于其细分的工艺分离面。部件在型架内的装配姿态以及零件的装配流程都会影响操作者的工作强度、装配效率以及装配质量的稳定性。人机工程学指出,操作者在进行装配时采用站姿装配正前方的零部件是生产效率最高的。表 1 所示为通过统计装配现场数据获得的不同装配姿态下的装配效率^[6]。

1.2 操作熟练度

随着飞机产能增长,整个装配系统的熟练程度都会提升,单架次的工时成本将会降低。1936 年,美国康奈尔大学 Wright^[7] 首次给出了每架飞机的理论工时成本

表 1 不同姿态下装配效率的相对关系
Table 1 Assembly efficiency in different posture

序号	姿态	装配效率/%
1	站姿、正前方装配	100
2	半蹲、正前方装配	95
3	弯腰、正前方装配	90
4	双膝跪地、前倾装配	85
5	单膝跪地、正前方装配	75~80
6	双膝跪地、俯视装配	65~75
7	下蹲、仰视装配	55
8	下蹲、正前方装配	50

随总产量的变化关系^[7]:

$$H = H_0 Q_{cum}^\alpha \quad (2)$$

其中, H 表示理论工时成本; H_0 为生产第一架的工时成本; Q_{cum} 为累计总产量; α 为熟练系数。当总产能翻倍时,工时成本下降率为^[8]:

$$\frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100\% = \frac{H_0 Q_1^\alpha - H_0 (2Q_1)^\alpha}{H_0 Q_1^\alpha} \times 100\% = (1 - 2^\alpha) \times 100\% \quad (3)$$

其中, H_1 为累计产量为 Q_1 时的工时成本; H_2 为总产量达到 2 倍 Q_1 时的工时成本。

公开资料显示,20 世纪 30 年代波音公司的工时下降率约为 20%。麦道公司 MD-90 飞机部件装配的工时下降率为 15%~20%^[9]。图 1 展示了 F35 飞机制造工时随总产量的变化^[10]。对式(2)两边取自然对数有:

$$\ln(H) = \ln(H_0) + \alpha \ln(Q_{cum}) \quad (4)$$

根据图 1 数据并结合式(4)可得图 2 所示拟合直线,对应熟练系数 α (斜率)为 -0.29,带入式(3)可得出 F35 飞机在总产量翻倍时,工时成本下降约 18%。

实际应用时,不同机型在结构形式、装配工艺以及生产管理模式等方面均存在差异,工时成本下降率可在

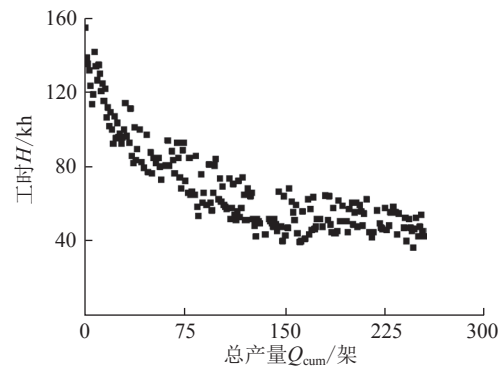


图 1 F35 飞机制造工时随总产量的变化关系

Fig.1 Relationship between F35 aircraft manufacturing hours and total production

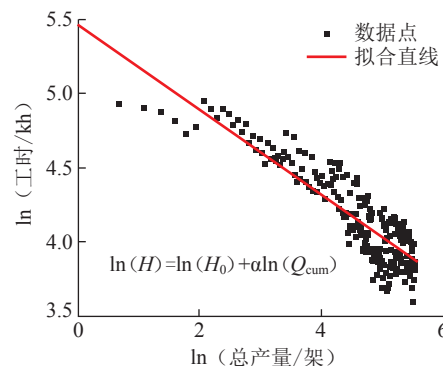


图 2 F35 飞机制造工时双对数拟合直线

Fig.2 Double logarithm fitting line of F35 aircraft manufacturing hours

15%~20% 范围内取值,同时对计算得出的理论工时进行修正:

$$H_{app} = \eta H_0 Q_{cum}^{\alpha} \quad (5)$$

其中, H_{app} 为修正后的工时; η 为修正系数,可通过在某产量下的实测工时 H_{test} 与理论工时 H 的比值得出:

$$\eta = H_{test} / H \quad (6)$$

1.3 倒班模式

飞机装配作为飞机制造的关键环节,对装配质量的要求高于一般的机械装配,采用常规的加班模式将使得装配操作者的身体机能由于劳动强度大而快速下降,劳动产出率降低,不能保证装配质量稳定。因此,可对装配操作进行专业细化,将诸如制孔、镗窝、铆接等一系列工序进行阶段性的划分,装配工人按组负责不同的阶段,轮番上架工作,实现“两班倒”或者“三班倒”工作模式。该倒班模式既能降低装配占架周期 50%~67%,又能使得工艺人员和操作人员都能保持充沛的工作热情,兼顾飞机的装配速度和质量。

1.4 制造资源

制造资源包括装配场地、型架、辅助设备等,是保证飞机装配能力的基本硬件条件。不论是并行制造还是脉动生产,都采用了以空间换时间的基本思路,使得对制造资源的需求大幅提升。在人力资源配置合理的情况下,装配能力(C)与型架数量成正比:

$$C = n \times \frac{T_{total}}{H_{ass}} \quad (7)$$

其中, T_{total} 为每年总工作日; H_{ass} 为每架占架周期; n 是型架数量。

1.5 一般能力社会化

一般能力是指在飞机装配过程中,技术成熟度高,技术难度相对较低,市场竞争充分,对最终产品质量、成本、交付、使用等不具有决定性影响的生产工序或工艺技术。一般能力社会化类似于世界民用航空业普遍采用的“主制造商-供应商”模式,洛克希德·马丁公司在 F35 的生产过程中也采用了类似的模式。一般能力社会化实现了风险、成本以及利益的分散和共享。

虽然一般能力社会化不会直接影响装配主线上型架的数量和占架周期,但是在厂房面积一定的情况下,将壁板组合、隔框组合等架下工作以及小段装配转移至供应商处,可以整理出更多现场装配面积,使得工艺布局更合理,物流更流畅,满足型架增长带来的面积需求,型架数量可表示为:

$$n = \frac{A_{ass}}{A_{tool}} \quad (8)$$

其中, A_{ass} 为装配区域总面积; A_{tool} 为单一型架及辅助工作梯面积。在对供应商的能力评估、生产组织、业绩考核合

理的情况下,一般能力社会化将会有效地提升装配能力。

2 装配能力测算方法

大部件装配一般需耗时数月,其实际装配能力会受到在制品和各部段装配能力匹配关系的影响,系统复杂。相比之下,部段件装配结构较少,便于生产管理、装配能力影响因素分析以及能力统计。综合上节的装配能力影响因素分析,可以得出部段件的装配能力:

$$C = \frac{T_{total}}{k \cdot \xi \cdot \eta C_0 Q_{cum}^{\alpha}} \cdot \frac{A_{ass}}{A_{tool}} \quad (9)$$

其中, k 为工艺方案系数,通过方案评估获得; ξ 为不同倒班模式下的占架周期系数(见表 2)。

图 3 所示为某型飞机装配流程甘特图,展示了主要占架装配任务和时序关系。飞机部件装配从 t_0 开始至 t_4 结束,整个装配过程中,部件装配能力 $C(t)$ 随时间动态变化。 t_0 时刻,各部段按照各自的装配能力 $C(t_0)$ 并行开展装配任务。 t_1 时刻的装配能力取决于当时油箱 A 的交付能力、进气道交付能力以及中机身对合能力中的最小值。 t_1 与 t_0 的差值等于油箱 A 装配与进气道装配中占架周期的最大值,其余过程以此类推。

表 3 所示为针对图 3 中装配任务给出的各部段占架周期和装配能力。受上一节所述因素的影响,表中数据随时间动态变化。结合装配流程甘特图中的时序关系(图 3)和各段装配能力基础数据(表 3)可以推导出飞机

表 2 不同倒班模式下装配占架周期系数

Table 2 Cycle coefficient of assembly jig in different work shift model

序号	倒班模式	周期系数 ξ
1	不倒班	1
2	“两班倒”	0.5
3	“三班倒”	0.33

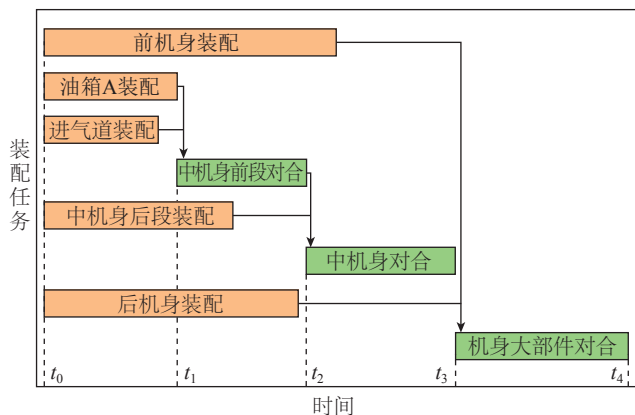


图 3 某型机装配流程甘特图

Fig.3 Gantt chart of assembly process of a certain aircraft

大部件装配能力测算方法流程图,如图4所示。

实际应用时,将图4所述算法用C++等编程语言写成小程序。由于资源配置和工艺优化的非连续性,各部件的占架周期 $H_{ass_i}(t)$ 和装配能力 $C_{ass_i}(t)$ 数据并不是连续的光滑曲线,适合用数据表的形式存储。小程序计算时调用表中数据,相邻数据点之间采用线性差值的方式提出数据。程序计算输出大部件装配能力和交付力达成时间。

结合图3所示装配流程,该型机部件装配能力变化数据如表4所示。采用图4所述方法可以得出,受在制品和各部件能力匹配的影响,从 t_0 开始,经过137个工作日后,机身大部件的实际装配能力为8架/年,其中中机身对合是瓶颈。后续为实现大部件装配能力的提升,需要重点关注中机身对合的装配能力,配置装配资源,实现能力匹配。

3 结论

(1)飞机装配属于典型的离散型制造,适合以部件为单位,通过型架的占架周期及数量测算部件装配能力,形成基础数据集。

表3 部件装配占架周期与装配能力

Table 3 Manufacturing cycle and capacity of component assembly

部段	周期 / (天 / 架)	能力 / (架 / 年)
前机身装配	$H_{ass1}(t)$	$C_{ass1}(t)$
油箱 A 装配	$H_{ass2}(t)$	$C_{ass2}(t)$
进气道装配	$H_{ass3}(t)$	$C_{ass3}(t)$
中机身前段对合	$H_{ass4}(t)$	$C_{ass4}(t)$
中机身后段装配	$H_{ass5}(t)$	$C_{ass5}(t)$
中机身对合	$H_{ass6}(t)$	$C_{ass6}(t)$
后机身装配	$H_{ass7}(t)$	$C_{ass7}(t)$
机身大部件对合	$H_{ass8}(t)$	$C_{ass8}(t)$

(2)装配能力随影响因素而动态变化,但各部件动态变化数据集并不是连续的光滑曲线,适合用离散的数据表存储变化曲线。

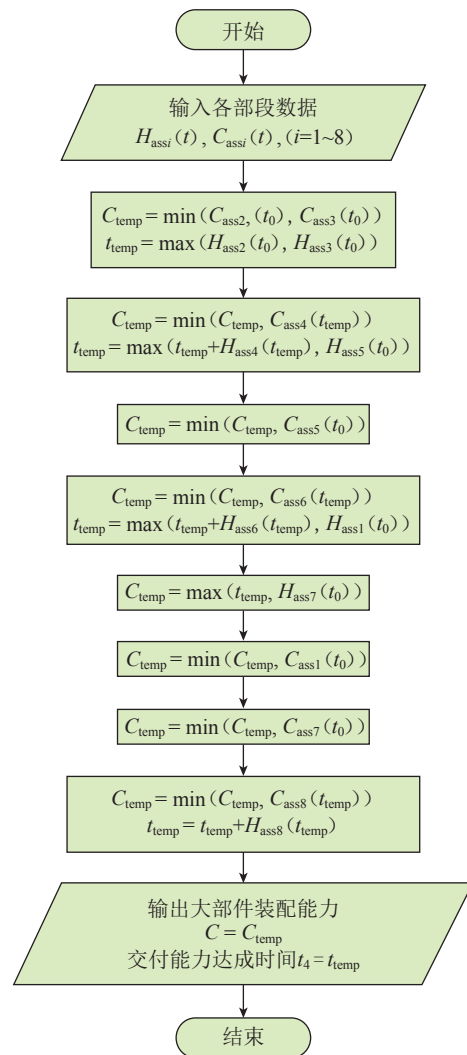


图4 大部件装配能力测算方法流程图
Fig.4 Flow chart of evaluation method for assembly capacity of large component

表4 某型机型架占架周期(天/架)与装配能力(架/年)数据表

Table 4 Manufacturing cycle and capacity of component assembly of a certain aircraft

时刻	H_{ass1}	C_{ass1}	H_{ass2}	C_{ass2}	H_{ass3}	C_{ass3}	H_{ass4}	C_{ass4}	H_{ass5}	C_{ass5}	H_{ass6}	C_{ass6}	H_{ass7}	C_{ass7}	H_{ass8}	C_{ass8}
t_0	68	9	31	10	26	12	30	10	44	10	38	8	59	10	40	8
t_1	62	10	31	10	25	12	28	11	40	15	36	8	55	11	38	8
t_2	58	10	28	16	24	19	27	11	40	15	36	8	52	12	36	13
t_3	55	16	26	17	24	19	25	18	40	15	35	13	50	15	36	13

(下转第102页)

39(4): 746-750.

[19] 谢旭霞, 张述泉, 汤海波, 等. 退火温度对激光熔化沉积TA15钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008(9): 1510-1515.

XIE Xuxia, ZHANG Shuquan, TANG Haibo, et al. Effect of annealing temperatures on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TA15 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008(9): 1510-1515.

[20] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第1部分 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

National Standardization Administration of China. Metallic materials-tensile testing—Part 1: Methods of test at room temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.

[21] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3075—2008 金属材料疲劳试验轴向力控制方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Standardization Administration of China. GB / T 3075—2008 Metallic materials-fatigue test-Axial force control method[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.

[22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4161—2007 金属材料平面应变断裂韧性 KIC 试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

National Standardization Administration of China. GB / T 4161—2007 Metal materials-determination of plane-strain fracture toughness[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.

[23] ZHANG B, SONG Z, LEI L, et al. Geometrical scale-sensitive fatigue properties of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloys with α/β lamellar microstructures[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(12): 1284-1288.

[24] REN H S, TIAN X J, WANG H M. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of a graded structural material[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 614: 207-213.

[25] SHI X H, ZENG W D, SHI C L, et al. Study on the fatigue crack growth rates of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy with basket-weave microstructure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 621: 143-148.

[26] GUO P, ZHAO Y Q, ZENG W D. Fatigue crack growth behavior in TC4-DT titanium alloy with different lamellar microstructures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(2): 277-281.

通讯作者: 谷美邦, 工程师, 硕士, 主要研究方向为舰载机制造, E-mail: 18640812356@163.com.

(责编 阳光)

(上接第 86 页)

(3) 受在制品的影响, 飞机大部件装配能力测算时需考虑时序关系, 以各部段数据表为基础, 调用实时数据通过匹配装配能力最终获得大部件实际装配能力。

参考文献

[1] 薛红前. 飞机装配工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.

XUE Hongqian. Aircraft assembly technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015.

[2] 刘强. 离散型生产线生产能力评估系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

LIU Qiang. Research on production capacity evaluation system of discrete production line[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[3] 王青, 温李庆, 李江雄, 等. 基于 Petri 网的飞机总装配生产线建模及优化方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015(7): 1224-1231.

WANG Qing, WEN Liqing, LI Jiangxiong, et al. Modeling and optimization for aircraft final assembly line based on Petri net[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015(7): 1224-1231.

[4] 屈琦, 贾晓亮, 郑植元, 等. 飞机部件装配生产线仿真研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 54-59.

QU Qi, JIA Xiaoliang, ZHENG Zhiyuan, et al. Simulation of aircraft components assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 54-59.

[5] 孙星. 基于 Petri 网和 eM-Plant 的飞机装配线建模与仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

SUN Xing. Modeling and simulation of aircraft assembly production line based on Petri net and eM-Plant software[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[6] 闫振国. 复杂产品装配系统的离散动态作业过程分析与优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.

YAN Zhenguo. Discrete dynamic job process analysis and optimization of complex product assembly system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.

[7] WRIGHT T P. Factors affecting the cost of airplanes[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1936, 3(4): 122-128.

[8] WANG T, HUANG H, YU C J, et al. Understanding cost reduction of China's biomass direct combustion power generation—A study based on learning curve model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 546-555.

[9] 程雪梅. 基于标准作业时间的 XX 航空转包项目装配产能优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

CHENG Xuemei. The xx aviation subcontract projects assembly capacity optimization based on standard operation time[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[10] U. S. Government Accountability Office. F-35 joint strike fighter: Development is nearly complete, but deficiencies found in testing need to be resolved [EB/OL]. [2018-06-05]. https://www.gao.gov/mobile/products/GAO-18-321?utm_campaign=usgao_email&utm_content=daybook&utm_medium=email&utm_source=govdelivery.

通讯作者: 龙安林, 工程师, 博士, 研究方向为飞机部件装配与结构弹塑性变形分析, E-mail: anlinlong@126.com.

(责编 阳光)