

自动钻铆环境下铆接 工艺研究*

Research on Riveting Process in Automatic Rivet

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 殷俊清 王仲奇 康永刚 郭飞燕



殷俊清

博士研究生,研究方向为飞机数字化装配工艺与装备。

以研制、引进等多种方式,自动钻铆技术在国内的应用已普遍展开。但由于实际生产应用经验的不足,在新的环境下铆接工艺仍多沿用传统的老方法来确定,这影响了先进的自动钻铆系统的作业效率。本文旨在通过分析传统铆接与自动钻铆不同环境下的铆接特点,探索新环境下铆接工艺的解决方法,为自动钻铆系统的应用提供可行的工艺方案。

的劳动强度。自动钻铆也已成为飞机数字化装配最成熟及应用最广泛的领域。以波音公司为例,在其飞机产品的制造过程中,自动钻铆广泛应用于机翼/机身壁板、机身半壳体和机翼机身对接等方面,形成了多种部件的生产线,机铆率达60%以上。

国外应用自动钻铆技术已有几十年的历史,先进的自动钻铆设备也不断被研制推出。其中,典型结构形式包括:配有数控托架的自动钻铆系统,龙门式自动钻铆系统以及机器人自动钻铆系统等(图1)。配有数控托架的自动钻铆系统(美国GEMCOR公司的G86、G2000为典型代表)一般由五坐标托架定位系统和自动钻铆机两大部分组成,主要应用

于机翼、机身壁板的铆接;龙门式自动钻铆系统(美国ELECTROIMPACT(EI)公司的E4000、德国BRÖTJE公司的MPAC^[1]为典型代表)一般由龙门式五坐标定位系统、末端执行器和柔性工装组成,主要应用于壁板的铆接以及壁板的拼接;机器人自动钻铆系统(美国EI公司、意大利B&C公司为代表)一般由双机器人组成,通过刚性轨道,机器人实现五坐标的定位。

国内对自动钻铆技术的研究起步并不晚,早在1977年,我国就已研制了ZMJ-01自动钻铆机^[2],但在设备的稳定性以及配套产品应用等方面尚存在问题。随着转包生产的增加,20世纪80年代中期开始,国内

自动钻铆技术自20世纪50年代开始,通过不断吸收新兴技术,已经逐渐发展成为一门综合多学科、多技术的专用技术。目前,自动钻铆技术已经实现了钻孔、插钉、铆接全过程的自动化,极大地提高了铆接作业的生产效率和质量,降低了作业人员

* 国家自然科学基金项目(51375396)资助。



(a) C型数控托架自动钻铆系统



(b) D型数控托架自动钻铆系统



(c) 龙门式自动钻铆系统



(d) 机器人自动钻铆系统

图 1 典型自动钻铆系统

主机厂先后引进了国外多个型号的自动钻铆机,但因其没有引进配套的托架等定位系统,定位系统的缺失使得自动钻铆技术的应用难以广泛开展。近几年,随着飞机型号研制和生产的需求,国内各主机厂、研究所和高校通过合作研究的方式进行了自动钻铆技术的深入研究,取得了显著成果。如中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司通过与西北工业大学联合研究,生产制造了与 G86 相配套的数控托架定位系统,并已应用于实际的型号生产。同时通过全套引进的方式,中航工业成飞公司成功地安装运行了中国航空领域内第一套用于复合材料部件自动钻铆的机器人加工系统。中航工业陕飞安装了 MPAC1694 龙门自动钻铆机,现已进入试铆阶段^[3]。

以研制、引进等多种方式,自动钻铆技术在国内的应用已普遍展开。但由于实际生产应用经验的不足,在新的环境下铆接工艺仍多沿用传统的老方法来确定,这影响了先进的自动钻铆系统的作业效率。本文旨在通过分析传统铆接与自动钻铆不同环境下的铆接特点,探索新环境下铆

接工艺的解决方法,为自动钻铆系统的应用提供可行的工艺方案。

自动钻铆环境下的铆接工艺特点

铆接作为飞机零部件装配中采用的主要连接形式,虽然有增加结构重量、易引起变形等缺点,但同时也具有很多适应于飞机结构装配的特点:连接强度稳定可靠、容易检查和排除故障、使用工具简单、适用于较复杂结构的连接。铆接的一般过程包括制铆钉孔、镗窝(对沉头铆钉而言)、注胶(对有密封要求的铆接而言)、插钉、铣平等作业步骤,如图 2 所示。

传统的手工铆接作业中,铆接的质量主要依靠作业人员的经验,制铆

接孔时孔的垂直度不易保证,且铆接时的钉与孔的同轴度、钉的垂直度也依赖作业人员的操作水平。同时,人工铆接所能施加的铆接力和力矩较小,铆接效率也较低。当然,传统的人工铆接也有自动钻铆系统所不能取代的优点,即铆接时的灵巧性很高,铆接范围也不受限制,尤其在结构件开敞性不好的情况下,传统铆接的优点尤为突出。传统人工铆接中,铆钉孔的位置确定有画线钻孔、导孔钻孔、钻模钻孔等方式,制孔工具为风钻。铆接一般使用气动铆枪,容易产生孔径超差、铆钉孔错位、埋头窝过深、镦头偏斜、夹层有间隙等缺陷。由于铆接力较小,铆钉杆镦粗不均匀,钉杆呈圆锥形,易使工件产生翘曲变形,对于高干涉量的铆接,难以胜任,而且工作环境噪音较大,劳动强度大。

自动钻铆系统由定位、测量、控制、送料、末端执行器等子系统组成。由于机床带有高速、高精度的转削主轴头,一次进给即能钻出 0.005mm 以内高精度的孔,同时埋头窝的深度也可精确控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内,再加上机床由数控系统控制各轴运动,并采用精密自动化工装夹具,使得铆钉镦头高度保持一致,不受人为因素的影响^[4]。自动钻铆系统的定位精度借助数控定位系统,可达到 $\pm 0.025\text{mm}$,同时铆接效率较传统人工铆接高 10 倍,由于铆接质量的稳定可靠,铆接后的结构寿命也可提高 6~7 倍^[5]。传统人工铆接与自动钻铆系统铆接作业特性如表 1 所示。



图 2 传统的手工铆接作业

表 1 传统人工铆接与自动钻铆系统铆接作业特性比较^[6]

作业特性	传统人工铆接	自动钻铆系统铆接
灵巧性	高(灵活性、自主性高)	低(由数控程序控制)
作业范围	受工装决定,对于开敞性较差的环境适应性高	受系统结构和运动特性控制
力/力矩	$F_{\max}=135\text{N}$ 施加力矩大小和时间有限	$F_{\max}=4550\sim 8000\text{N}$ 施加力矩大,可根据实际需求调节、作用时间长
加速度	0.2g	2g
定位精度	有限(需导引)	高(可达 $\pm 0.025\text{mm}$)
铆接序列记忆	有限	无限(依靠计算机存储能力)
成本	低	高
抗疲劳能力	易疲劳	不易疲劳,可长时间持续运行

自动钻铆环境下 铆接工艺探索

根据上文的论述,可以看出在运用自动钻铆技术的环境下,铆接的质量和精度主要依靠自动钻铆系统的运动和定位精度,单颗铆钉的铆接效率不再受制于操作工人的水平,而在于系统数控代码的编制。目前,国内在自动钻铆技术的应用上在不断深入,各种型号的自动钻铆系统或研制或引进,产品的机铆率也在不断提高,但是新环境下的铆接工艺仍主要停留在以前传统铆接的阶段,自动钻铆系统的应用存在以下几个问题:

(1) 传统铆接环境下,铆接工艺的参数获取主要依靠铆接工艺试验,即通过操作人员的试铆,确定铆接时的具体工艺参数。目前,自动钻铆系统的应用中,也主要采取了这样的传统方式,即用工艺试片在正式生产产品之前进行试铆,确定加工产品时所需要的工艺参数数值,一旦更换产品的材料规格和尺寸,则需要再次进行试铆。工艺试片试铆的方法虽然有效,但是需要大量的试片进行试验,不利于资源的有效利用,浪费了材料,同时需耗费较多的时间。

(2) 自动钻铆系统虽然单颗铆钉的铆接效率极高,但是由于每个铆接点都需要系统进行姿态和位置的调整,因此铆接的顺序和路径的规划

就显得尤为重要,合理的铆接顺序和路径规划可以有效地发挥自动钻铆系统高效率的优势。

(3) 国内飞机产品的特点虽然是小批量多型号,但是部分零部件在铆接时工艺上有相似或相通之处,因此需要对每次铆接的工艺参数和铆接质量数据进行有效的存储和管理,以期通过数据整合和相关的优化算法,在相似或相通的产品生产中能得到应用,将原本操作人员宝贵的实践经验量化成具体的数据流进行存储,使经验得到有效的传承。

笔者认为,通过试验设计与规划

理论、仿真技术和商用仿真软件,以及数据库技术就能很好地解决自动钻铆系统在实际应用中所需解决的问题,实现铆接工艺的数据化、流程化和规范化,如图 3 所示。

1 自动钻铆工艺试验规划

传统人工铆接环境下,工艺试验的规划主要依据以前的生产实践和工人的生产经验,通过试铆,检测铆接后的质量,只要其符合设计的需求即认为满足生产要求。自动钻铆的新环境下,铆接的工艺参数较传统铆接增加了不少,许多参数在传统环境

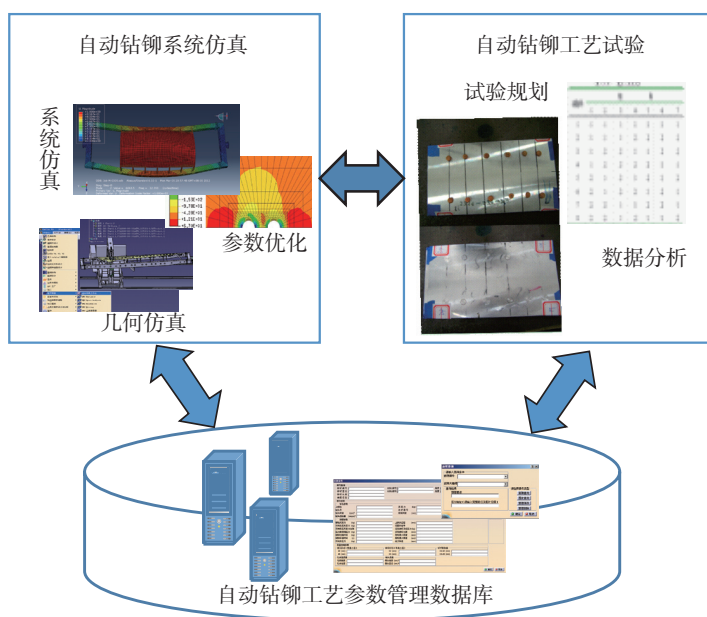


图 3 自动钻铆环境下铆接工艺总体方案

下无法定量进行施加,而在自动钻铆系统中可以通过数控设备实现。典型的工艺参数包括^[7]:

(1) 制孔参数: 主轴转速、进给速率;

(2) 铆接参数: 压铆力、压力脚回缩压力、夹紧解除力、双向挤压夹紧力、铆接过程时间、铆接停留时间等。

新的工艺参数的出现以及部分工艺参数数量级的改变,导致传统经验大部分无法沿用,需要大量的工艺试验,耗时耗力。因此需要采用科学的试验设计和试验规划,在不影响试

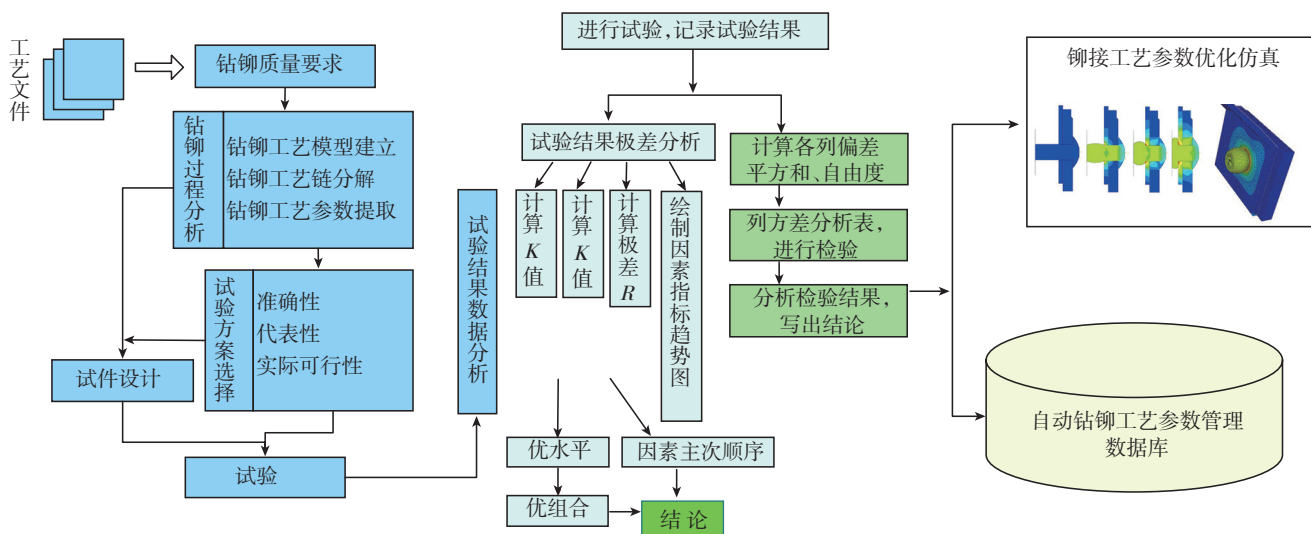


图4 自动钻铆工艺试验规划流程

验效果的前提下,尽可能地减少试验次数。正交试验设计就是解决这个问题的有效方法。如图4所示,首先以钻铆质量要求为基础,进行钻铆过程分析,针对产品建立钻铆工艺模型和工艺链,提取需要确定的钻铆工艺参数;在确定了钻铆工艺参数的数量和各参数的数值范围后,选取相应的正交试验表,确定试验方案,进行试件的设计;通过试验结果的分析,确定产品生产的工艺参数数值。同时通过数据分析,可以获取工艺参数对质量影响的主次性。文献[7]即通过正交试验设计和极差分析等数据分析方法,获取了无头铆钉铆接时工

艺参数影响的主次顺序。

2 自动钻铆系统仿真

国内外对仿真技术的深入研究和应用,充分体现了仿真技术在装配过程中的重要性。装配仿真与优化技术在波音和空客中的有效应用证明,仿真技术可以有效地缩短装配工艺设计周期,同时降低装配成本。作为飞机装配中的重要环节,自动钻铆系统也同样适用。仿真技术在自动钻铆系统中的应用主要可分为3部分,如图5所示。

(1) 系统变形仿真。

自动钻铆系统一般结构较大,虽然机械设计之时就已考虑了结构变

形和强度的优化,但由于自重等因素变形在所难免,以GEMCOR公司的G86自动钻铆系统为例,由于定位托架跨度较大,再加上工装和产品之后,自重等因素必定引起托架的变形;其次,不同的作业姿态引起的重心偏移,易引起铆接时的位置偏差。通过建立自动钻铆系统的结构模型,运用商业仿真分析软件,获取系统结构和典型姿态下的变形量,在进行数控编程时进行变形补偿,可以有效地减少数控代码的修正次数,控制最终产品的变形量。

(2) 几何运动仿真^[8]。

飞机连接件的铆接工作量巨大,如波音747每架有铆钉200万个,伊尔86每架有铆钉148万个;此外,在自动钻铆过程中,产品需要定位夹紧装置固定其在自动钻铆系统中的空间相对位置。夹紧装置的使用使得在整个铆接过程中,需要更换定位卡板或调整定位夹持位置,以便于完成定位夹紧位置的补铆。合理的钻铆路径可以减少自动钻铆系统移动行程和更换定位卡板及夹持装置的次数。通过几何运动仿真,一方面可以检查作业过程中可能产生的系统各运动机构之间、系统与产品之间干涉现象,修正数控代码;另一方面,可

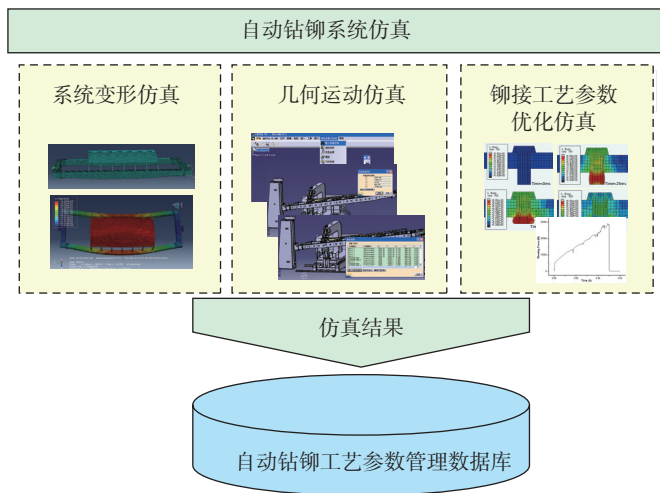


图5 自动钻铆系统仿真

以检验钻铆路径的效率,以产品的整体加工时间为目标,优化数控代码。

(3) 铆接工艺参数优化仿真。

铆接工艺试验虽然能够获取适合产品加工的工艺参数数值,但是由于工艺参数的可调整范围比较大,受限于试验量,无法进行工艺参数最佳值的优化。借助仿真技术,以工艺参数试验数据为基础,进行工艺参数优化仿真,可以有效地减少工艺试验次数,同时将得到的优化结果反馈给工艺试验,可以提高工艺试验的有效性。

3 自动钻铆工艺参数管理数据库

自动钻铆工艺试验数据和生产作业中的实际工艺参数数据,传统铆接情况下这些数据以纸质试验结果和操作人员经验进行存储,不利于试验数据的管理和试验经验的传承及积累。自动钻铆系统仿真生成的数据和电子文档,也需要建立数字化存储方法,并通过与企业现有的CAD/CAE软件信息共享及CAPP系统集成,供操作人员查阅和调用,指导产品的工艺试验和生产作业。传统数据库系统只能对数据信息进行管理,与国内飞机制造企业广泛使用的CAD/CAE软件无法信息共享,因此自动钻铆工艺参数数据库不能简单利用传统数据库系统。

在分析国内主机厂CAD/CAE软件应用的基础上,利用相关软件的二次开发技术,结合传统数据库,实现对自动钻铆工艺试验数据、自动钻铆系统仿真数据、自动钻铆系统作业数据等各工艺数据的管理,并选择合适的通讯模式,实现与CAD/CAE软件的信息共享和CAPP系统的集成。

自动钻铆工艺参数管理数据库在实现数据存储和管理的基础上,通过调用人工神经网络、遗传算法等优化算法,可以进行自动钻铆工艺参数组合的优化,进一步充实数据库内容。随着自动钻铆系统的深入应用,

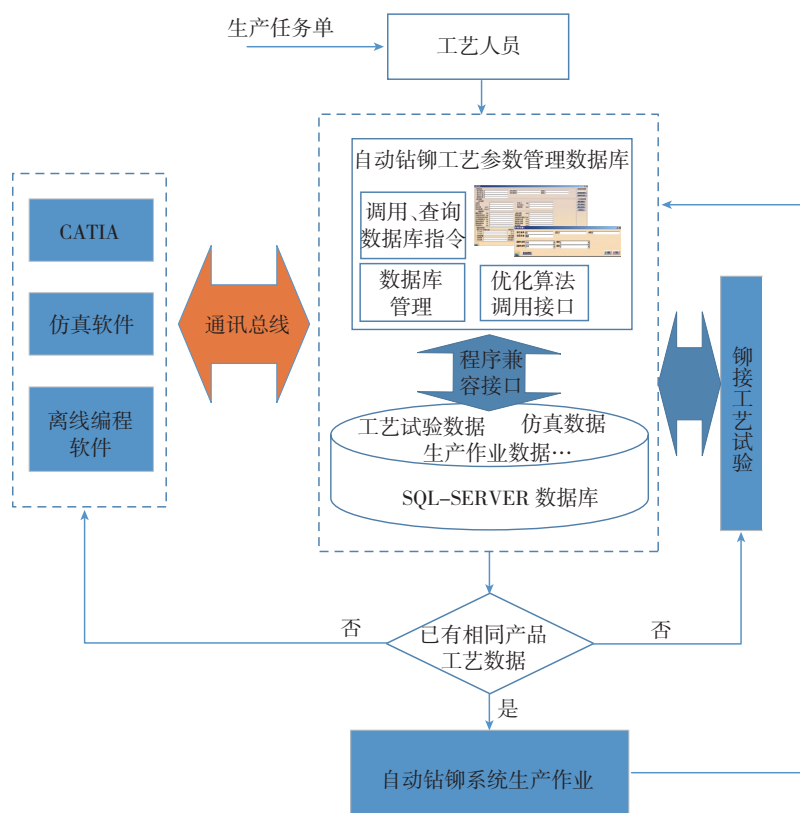


图6 自动钻铆工艺参数数据库下的工作模式

工艺参数管理数据库可以不断得到扩展,从而提供更优的产品自动钻铆工艺解决方案。如图6所示,为自动钻铆工艺参数数据库下的工作模式示意图。

结束语

自动钻铆系统在国内的应用正在深入开展,新环境下各主机厂、研究所及高校对钻铆工艺也进行了多方面的研究和尝试。本文在分析了传统人工铆接和自动钻铆技术各自特点的基础上,提出了新环境下的铆接工艺解决方法,即工艺试验、仿真与数据库管理系统相结合,为实际生产中自动钻铆铆接工艺方案提供参考。

数字化装配是未来飞机制造的发展趋势,自动钻铆技术作为数字化装配中的重要组成部分,在大飞机数字化装配中,结合其他装配装备,必

能凸显其重要作用,推动我国大飞机装配水平的提高。

参考文献

- [1] 邓锋. MPAC自动钻铆机. 航空制造技术, 2010(6): 26-29.
- [2] ZMJ-01型自动钻铆机应用于生产. 航空工艺技术, 1977(2): 42.
- [3] 闻立波. 宝捷之行——参观后记. 航空制造技术, 2013(17): 68.
- [4] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用. 航空制造技术, 2005(6): 50-52.
- [5] 顾之宇. 自动钻铆系统的模块化设计及其实现方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010.
- [6] 许国康. 自动钻铆技术及其在数字化装配中的应用. 航空制造技术, 2005(6): 45-49.
- [7] 刘连喜, 李西宁, 王仲奇, 等. 无头铆钉自动钻铆工艺试验研究. 西北工业大学学报, 2013(1): 77-82.
- [8] 殷俊清, 王仲奇, 康永刚, 等. 仿真技术在飞机自动钻铆中的应用. 航空制造技术, 2009(24): 84-87.

(责编 亦非)