



中国直升机设计研究所 陈怡枢



陈怡枢

中国直升机设计研究所研究员，复旦大学力学与工程科学系客座教授，南昌航空大学兼职教授。我国直升机发展规划和技术发展政策主要起草人。曾获国家科技进步二等奖，总参谋部科技进步一等奖，航空工业部科技进步一等奖，享受国务院政府特殊津贴。

一种先进的直升机既是经过技术创新设计出来的，也是采用先进的工艺制造技术研制生产出来的，两者既相互制约，又相互促进。这就要求直升机设计人员应该具有缜密的科学思维，建立科学的设计理念，掌握科学的设计方法，并懂得设计与管理、工艺制造、成本经济几方面的紧密、互动关系。

### 直升机发展简述

纵观直升机 60 多年的发展历史，可以看到推动直升机技术的发展主要依赖于旋翼升力系统技术、动力装置技术、材料和结构技术以及微电子信息技术的发展。航空工艺制造技术的不断创新和进步都积极促进和推动了直升机相关技术的发展。从第一代直升机逐步升级至第四代直升机时，其飞行速度已达到 350km/h 以上，耗油率降低到

0.2kg/(kW·h) 左右，结构空重比降到 0.3 左右，全机振动水平降到约 0.05g，噪声水平降到 85dB 以下，桨叶达到无限寿命，而飞行小时费用降低了 1/5 ~ 1/3。这些先进性能指标的实现得益于直升机技术的进步，而每一项技术进步又都要求相关的航空材料、工艺制造技术有创新或进步，它们与先进复合材料加工制造，新型钛合金结构工艺制造，激光、电火花、电解、电子束等特种工艺制造，

精密和超精密加工制造,以及计算机辅助制造等航空先进工艺制造技术的实用化和水平的不断提高是分不开的。

直升机的发展经历了几次重大的革命,第一次是由活塞式发动机到涡轮轴发动机的变革,它使直升机的重量更轻,有效载重大大增加,总体综合性能显著提高。第二次是先进复合材料结构的广泛应用,与传统的金属结构为主的直升机相比,其零件数量减少 80% ~ 90%,结构重量降低 25%,加工制造工时减少 40%,维护费用降低 50%,巡航速度提高 35%。直升机数字化工程是直升机制造业的又一次革命,它是一门集计算机、网络、自动控制、数字化加工、现代直升机设计、制造和管理等诸多技术为一体的直升机研制综合系统工程。直升机数字化工程的实质,就是通过并行工程和设计制造一体化,把上述技术全面应用于直升机设计、加工制造和使用服务中;它是最充分、最科学合理地利用设计和加工制造资源,改变传统的直升机设计、制造方式和理念,全面提升直升机研制能力的必要手段。不久的将来,智能材料结构、纳米材料和纳米技术及其相关制造技术在直升机开发研制中的实际应用,将迎来直升机发展的又一次重大革命,届时将会出现性能更先进,应用更广泛的智能自适应结构直升机和微型、超微型直升机。

现代直升机经典技术已经比较成熟,产品质量和技术性能也日臻完善。在满足不同特定任务和使用要求的前提下,军用直升机除具有先进的性能和机动能力外,在隐身性能,抗弹击、抗坠毁生存力的能力,以及可靠性与寿命方面的要求更加突出;而民用直升机则更加注重安全、可靠、经济、舒适、环保。这就要求直升机设计人员应该具有缜密的科学思维,建立科学的设计理念,掌握科学的设计方法,并懂得设计与管理、工

艺制造、成本经济几方面的紧密、互动关系。

## 直升机设计与工艺制造技术的紧密互动关系

一种先进的直升机既是经过技术创新设计出来的,也是采用先进的工艺制造技术研制生产出来的,两者既相互制约,又相互促进。历史经验告诉我们,两者之间良好的紧密互动关系可以创造出质量优、性能好、安全可靠的先进实用的直升机,否则的话,研制生产出的产品将是质量低下,可靠性差,飞行事故频发的,甚至会造成机毁人亡的严重后果,其经验是深刻的,教训是惨重的。

### 1 细节设计与精细加工

直升机的研制生产过程是一个宏大的系统工程,它涉及的面很广,参与配套研制的单位有几百个,主机设计开发人员有数千人,生产的零件有上千万种,各种材料加工工序有几十万道,成功的背后是几十万无名英雄做好自己分工承担的每一个细节,而失败则往往只是几个甚至一个设计或加工制造细节的失误。在直升机工程领域有:“细节决定成败,关注细节就是关注全局”的说法。在我国直升机发展的历程中,由于某些细节失误而造成巨大损失的例子并非鲜有。

20 世纪 50 年代我国仿制的第一代直升机,由于选料和加工工艺存在问题,致使桨叶蒙皮与大梁和后缘蜂窝脱胶、前缘包铁与大梁脱胶,险些造成飞行事故;由于加工和处理不当,造成主减速器外套圈裂纹,先后造成 5 起等级事故;由于桨毂轴颈细节设计和工艺方法不合理,出现加工质量问题,引起机械故障并先后发生 3 起一等事故,造成该型机 1 年试制,3 年返修的恶果。

在六七十年代,我国研制的第二代直升机某型机由于体内减速器滑动轴承结构细节设计问题,加之滑油耐热性差,致使出现发动机体内减速器抱轴,造成机毁人亡的一等飞行事故。另一型机由于材料加工和处理不当,曾出现中减速器主动齿轮裂纹的故障,幸未造成飞行等级事故;中尾减速器轴承由于设计以及加工精度、粗糙度差等原因,造成滚子、内外环道出现印痕和剥落现象,致使疲劳寿命试验不合格,延误了 3 年以上的研制周期。某型机的侧滑动舱门,由于锁具细节设计问题和框板工艺制造配合公差控制不严,先后造成 2 次空中飞行脱落事故,幸未造成人员伤亡。

### 2 设计与制造误差

某型机由于设计的误差和结构件材料加工控制不严,加上成辅件超



欧洲“虎”式直升机

重,致使直升机尾梁一框后部严重超重,全机静力试验加载到75%,造成尾梁失稳破坏。而随后自行设计研制的我国第三代直升机,又重犯若



千年前的错误,基本由于同样的原因,再次发生机身后段在静力试验到86.25%时提前破坏。这2次事故均造成2~3年研制周期的延误和研制经费的极大浪费,教训是深刻的。

抗疲劳特性是直升机动部件的主要设计要求,在研制某型机的主桨毂时,由于我国高强度结构合金钢材料在达到满足强度性能指标时,其韧性指标很差,对主要抗疲劳结构件,在材质处理改性方面经过近8年不断探索,才满足了疲劳设计的要求。而零部件材料加工和处理过程又经历了长达数年的工艺方法、工艺参数的试验研究,不断改进才达到国外同类先进水平构件的指标。

### 3 先进复合材料设计与制造

现代直升机大量采用先进复合材料,具有简化机体结构、大幅度降低结构重量、提高飞行性能、降低生产和使用维护费用、缩短加工制造周期等优点。复合材料结构是设计与工艺制造融为一体的新技术,其选材、铺层设计、工艺方法、工艺流程和工艺参数的确定是其综合性能好坏的决定因素。某型直升机的尾部是整体复合材料结构,由于蜂窝件结构设计存在问题和胶料用量及工艺参数控制不严,不仅造成尾梁结构严重超重、剩余强度过大,而且还出现结构变形、Nomex蜂窝压塌和滑移、层

压板厚度和孔隙率超标,致使直升机性能有较大降低。为保证满足战技指标要求,必须返工重新调整、协调某些总体参数,同时对尾梁全复合材料

结构的设计、工艺方法、工艺参数进行新一轮设计优化,因此大大影响了新机的研制进度。

因此,提高复合材料加工技术和机械化

自动化成形水平,以及固化监控技术水平是实现直升机大量采用复合材料、提高直升机研制水平的必要前提。

### 直升机技术新进展 对制造技术的新要求

我国直升机工业长期落后于世界先进水平,主要存在基础技术研究滞后,动力装置技术水平差距大,基础材料工业落后等问题,但工艺制造技术落后亦是一个重要因素。进入21世纪后,由于军、民用市场需求的拉动,我国直升机将进入一个快速成长和发展期,直升机工业会有很大的增长,直升机技术也会有很大的发展,直升机技术和工业的巨大发展又会对工艺制造技术提出新的要求,而新的先进工艺制造技术的每一次突破,都将给直升机技术带来一场新的革命,并将促进直升机技术和综合性能达到一个新的高度。

未来,直升机技术与飞机、航天、

潜艇、汽车等高新领域相互融合,通过更先进的材料与工艺制造技术的不断改进和应用,必然会将直升机技术推向一个更高的水平。

#### 1 智能材料工程与纳米制造技术

目前,在改进和提高传统材料制造工程技术的同时,科研人员很注重发展新型材料和加工制造技术,新的结构材料将向高功能化、高性能化、复合化、智能化和纳米化方向发展。其中智能材料结构和纳米制造技术的完善和实用化将对直升机的发展带来新一轮的革命性变化。

智能材料的工程化将促进自适应结构(如自适应旋翼结构、相控阵雷达天线自适应机身结构、自适应座舱结构等)的发展,可以选择主动控制式或被动控制式结构,通过将传感器阵列、光电器件、微处理器埋在复合材料结构件中的方法实现控制,如压电材料在主动控制桨叶中的应用,可实现2500次/min的控制,达到 $-4^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 的变距要求,其重量还能减轻20%~40%,雷达反射面减少到 $0.1\text{mm}^2$ ,直升机机动性能大大提高。智能材料通过智能材料致动器可降低桨叶旋涡的交互作用(BVI),减少桨叶高速脉冲干扰



(HIS),通过高频与低频主动结构控制器,可降低座舱噪声和振动。

纳米技术的开发进展将从分子、原子层次纳米元件推进到电子层纳米元件,基于超微电子、超微工程结

构和器件研制成功和商品化,开发研制超微型直升机将完全成为可能,它将在国防军工和国民经济领域,特别是在超低空领域、城市作战中的侦察、干扰、通信中继、目标指示和生化武器探测等方面发挥独特而高效的作用。

## 2 隐身结构材料制造技术

低空和超低空执行作战任务的直升机,容易遭遇机炮、火箭、地空导弹和敌机的攻击,采用全隐身技术是提高直升机生存能力的有效方法。全隐身技术包括雷达隐身技术、红外隐身技术、视觉隐身技术和声响隐身技术,其中,雷达隐身和视觉隐身与材料加工制造技术更为密切相关。

雷达隐身可以通过外形设计、隐蔽、屏蔽等隐身技术以及相关制造技术来力求减小目标的雷达散射截面积 RCS 值,也可用等离子隐身技术来吸收部分雷达波,部分改变传播方向,还可改变反射信号频率,以达到隐身目的。而采用雷达吸波材料和雷达透波材料(包括玻璃纤维加强合成树脂、石墨与环氧树脂、以芳纶纤维为基的凯芙拉等雷达吸波复合材料,以及纳米吸波和透波新型涂料等)是实现隐身的最普遍的手段。

视觉隐身的重点是开发能感受环境变化并能作出响应的灵敏材料,如采用色变凝胶体和涂料(包括热致色变二氧化钛,光致色变的掺有银粉的二氧化钛和电致色变材料),及其相关制造技术的应用,可以迅速从一种颜色变为另一种颜色,还能改变表面的灰度,特别适用于直升机的视觉隐身。

## 3 直升机传统工艺制造技术

我国直升机传统工艺制造技术经过 50 年的发展已经取得了长足的进步,但随着直升机技术的快速发展与进步,高强度、高韧性、高精度的大型钛合金结构件的精密加工制造技术,全结构先进复合材料机械化、自动化的成形与加工以及固化监控一

体化技术,大尺寸数控钣金成形制造技术,激光加工、电脉冲加工、等离子喷涂等特种加工制造技术与世界相关先进加工制造技术相比还有相当大的差距,要进一步对某些工艺加工机理、工艺方法、工艺参数、工艺流程、工艺加工自动监控检测,采用计算机控制工艺加工制造过程,在产品质量等方面加强自主研究与开发,形成有自主知识产权的先进工艺加工制造技术。

要重视和积极推进工艺加工制造技术标准的不断升级,与国际先进的工艺制造标准接轨。我国制造业长期以来重视产品标准、材料标准,

而对工艺制造标准不够重视。一项标准往往贯彻执行十几年,标准的更新、提升速度远远落后于直升机技术的发展与进步,使得我国工艺制造标准长期与国际先进工艺制造标准存在很大的差距。没有先进的标准,就不会有相应的先进工艺制造技术和与之配套的先进检测、计量设备,也就不可能制造出高性能、高质量的产品。我们应该通过与国外主要航空企业的合作,不断引进最新的先进工艺制造标准,并在全行业推广,尽快实现在技术与管理上与国外先进企业接轨,以提高直升机产品在国内外市场上的竞争力。(责编 钟元)



**传播现代制造业信息的平台  
搭建厂商与用户合作的桥梁**



50



航空制造技术杂志社  
Aeronautical Manufacturing Technology Magazine

电话: 010-85700465 传真: 010-85700466 http://www.mta.net.cn