

上海市科学技术奖励大会 特别报道

镜像铣技术与装备的突破有力支撑了国产大飞机的发展,更对中国制造走向高端意义重大

五博士创业,摘下“工业皇冠上的明珠”

■本报记者 沈淑莎

上海光华路888号的重装厂房内,轰鸣的机器日夜不停地运转着。这里组装的通用型五轴联动车铣复合加工机床,预计今年销售将突破百台。它的出现,有望给中国装备制造业带来翻天覆地的变化。

研发这款工业机床的上海拓璞数控科技股份有限公司,由上海交通大学机械与工程学院教授王宇哈等五位毕业于上海交大的博士共同创立。16年来,他们跨越从实验室到市场的鸿沟,发明了大型柔性零件的精密加工方法——镜像铣,解决了飞机和火箭超大超薄柔性曲面的绿色高精高效加工难题。

镜像铣作为一款数控机床,是高端工业母机的典型代表,用于解决航空航天大型柔性曲面零件的加工难题。在拓璞数控突破之前,全球仅有两个研究团队掌握这一技术,并对我国实施技术封锁。拓璞公司研制的全球尺寸最大的12米卧式双主轴镜像铣装备,将空间精度比国际最高水平提升了一倍。镜像铣技术及装备的突破,不仅有力支撑了我国大飞机和空间探索事业的发展,更对中国制造走向高端意义重大。

昨天,这项由上海交通大学牵头,上海拓璞数控科技股份有限公司、上海飞机制造有限公司、上海航天设备制造总厂有限公司、天津航天长征火箭制造有限公司和成都飞机工业(集团)有限责任公司共同完成的“航空航天大型曲面蒙皮/箱底双主轴镜像铣削技术与装备”项目,被授予2022年度上海市技术发明奖特等奖。

精确控制“针”和“顶针”,巧解飞机制造中的“鸡蛋壳难题”

为什么说大飞机制造难?不妨从一块金属蒙皮说起。

机械加工行业流传着这样一句话:“硬的不怕,就怕软的”。零件越硬,越是用切削的方法把它加工出来,如果要加工的是怕雕、怕凿、怕碰的“鸡蛋壳”呢?

包裹在飞机骨架外部的蒙皮,是决定飞机疲劳寿命的主承载零件,占机身总面积的80%、总重量的21%。虽然从外表看只是一块金属薄皮,却有10层厚度,最薄处跟鸡蛋壳差不多。

由于飞机对重量有严格要求,因此蒙皮也必须在保证强度的情况下尽量“减重”。飞机蒙皮在加工过程中的动态变形高达壁厚精度的60倍,极易出现壁厚不均、铣穿孔洞等问题。

长期以来,蒙皮薄壁件的制造方法为化学腐蚀法,即用化学试剂腐蚀掉多余的金属。这种工艺流程漫长,会排放大量废液废气,影响工人身体健康,由此加工的产品精度低、制造周期长、表面质量差。

镜像铣是解决柔性薄壁蒙皮类零件精密制造的最新技术。何谓镜像铣?会计线活的人应该知道,当针线穿过柔软的布匹时,需要用戴在手上的顶针提供支撑力。镜像铣就相当于用一面顶针在蒙皮上雕刻,一面由顶针提供小范围支撑。蒙皮两侧的设备互相对应,协同行动,如同镜像。

既然技术思想与针线活如出一辙,那么难点在哪儿呢?王宇哈说了两个简单的词:精度和控制。在精度上,拓璞团队挑战了数控机床领域最高自由度——五轴。在空间中,三个直线轴和两个旋转轴理论上可以定位任一坐标,这也意味五轴机床能加工出任意形状的零部件。又因为这是一台镜像铣设备,说是五轴,实际上是双五轴,而且加工范围超过50m³,在如此超大的空间内,五轴联动的空间精度要求较常规机床提升十倍以上。

一个案例可以说明五轴镜像铣对精度要求到了什么地步。2019年,拓璞公司在临时租借的场地中装备的机床加工产品始终无法合格,工人们急得团团转。公司制造专家钟磊博士和制造部经理陈玉龙连夜赶赴现场,可半夜测量的结果竟然全部合格了。直到清晨,大家对着激光干涉仪的数据思考时,一辆汽车的鸣笛声打破了沉寂,大家这才恍然大悟。原来问题出在厂房旁边的公路上,车辆经过造成的振动被设备上侧的X轴放大,导致定位误差波动。

在控制上,以镜像关系存在的“针”和“顶针”需要在高速运转下保持完全一致的行动。由于蒙皮只有鸡蛋壳般厚,如果一侧用力而另一侧没有顶住,结果就会是一个窟窿。

奖项:2022年度上海市技术发明奖特等奖
项目名称:航空航天大型曲面蒙皮/箱底双主轴镜像铣削技术与装备

获奖团队:上海交通大学、上海拓璞数控科技股份有限公司、上海飞机制造有限公司、上海航天设备制造总厂有限公司、天津航天长征火箭制造有限公司、成都飞机工业(集团)有限责任公司



▲蒙皮镜像铣削加工。(受访对象供图)

▲上海拓璞数控科技股份有限公司厂房内景。本报记者 袁婧摄

制图:冯晓瑜

记者手记

拓璞突围不是偶然

■本报记者 沈淑莎

“拓”寓意开拓,“璞”寓意璞玉,“拓璞”寓意开拓创新、璞玉臻。上海的创新创业环境孕育出怀揣一腔报国热情的拓璞数控,这不是偶然。”说起创办拓璞的初心,王宇哈无比感怀。

拓璞的成功,与上海交大敢闯敢试、探索促进科技成果转化体制机制分不开。2007年之前,王宇哈一直是上海交大机械与动力工程学院的教授,当他决心创业时,学校为免其后顾之忧,为他保留了教授职位。虽然如今“留岗创业”已十分普遍,但在当时,学校拿出如此举措,需

要十足魄力。创业初始,王宇哈团队人手严重不足,同在交大的林忠钦院士将自己的团队成员“借”给他用。两个团队都在攻关航空航天任务,在研究上有诸多共性难题,他们相互学习,在质量控制方面,林忠钦院士团队对王宇哈团队的帮助巨大。直到今天,王宇哈仍是上海交大的教授。如今,他把课堂搬到了拓璞的厂房中。每年有不少学生来到光华路888号实习,一线的实践经验对他们认识行业、确立目标、精进技艺大有裨益。

“五博士创业”的故事在上海交大大学生中代代相传。眼下,上海交大已是投资人眼

中最受欢迎的高校之一,校区附近的“大零号湾”也是上海创业热度最高的区域之一。

本年度上海科技奖的榜单上,上海交大作为第一完成单位共有40项成果(人)获得表彰,其中特等奖1项,一等奖27项。在交大校内的“基础研究特区”,数十个前沿探索课题正在稳定支持下研究推进。而在交大周边的“大零号湾”,目前有60余家交大师生创业企业入驻,总估值超过500亿元,其中估值超过2亿元的有29家。据不完全统计,目前交大师生、校友在“大零号湾”开办企业已超过600家。

对标世界级科创湾区,2035年,“大零号湾”将形成万亿市值的高新技术企业集群。王宇哈相信,在上海火热的创新创业氛围中,这里一定能诞生一批和拓璞一样杰出的公司。

这样的情况在研发早期经常发生。2018年,王宇哈和公司技术总监毕庆贞正在开会分析工件铣穿的原因,会开到一半,楼下工人就跑来报告,刚才镜像铣又把工件铣穿了两次。镜像铣对控制的苛刻程度,就好比要求足球场上奔跑的两名运动员脚下的足球运动轨迹完全一致。”王宇哈说。

经过团队艰苦研发,终于解决了镜像铣的复杂控制可靠性问题,铣穿工件的“事故”从几乎每天发生减少到五年都未碰到,大大提升了镜像铣机床应用的可行性,用户终于可以放心地使用镜像铣机床加工贵重工件了。

三个月“烧”完1500万首笔融资,“穷博士”创业迎来政府支持

2007年,王宇哈等五位毕业于上海交大机械专业及管理专业的博士创建了拓璞数控公司。之所以有了开公司的冲动,王宇哈说,是因为当时觉得五轴机床这个产品距离突破就差“临门一脚”,大家一心想把产品做出来。

怀揣着一腔热情的博士们没有等来期待中的“临门一脚”,反而率先品尝到了被市场退货的苦酒。雪上加霜的是,仅仅三个月,他们就“烧”光了第一次在资本市场上融到的1500

万元,公司发展举步维艰。

2008年春节,给工人发完工资后,几位创始人的口袋里所剩无几,工厂会议室里却坐着各地前来“讨债”的供应商。

其实,就产品质量来说,被退货的产品完全符合各项指标,但因五轴机床需要大量切削液冲走铣削过程中产生的金属废料,产品有微小漏水用户也无法接受。王宇哈感慨:“打磨出一个被市场接受的可靠产品,其投入甚至是核心技术突破的10倍!”

好在,比起微米级别的精确控制,“漏水”只是团队初战市场遇到的小问题,这更让博士们意识到搞产品和搞科研的极大不同。脱去“书生气”后,他们很快推出大飞机自动钻铆设备、五轴联动数控机床等近10项国内领先的高端装备核心技术产品。

2012年,拓璞实现财务收支平衡,高速发展的公司对场地有了更多要求。而高端制造装备加工所需的高标准重装大厂房,不是“穷博士”能负担得起的。为了寻找创业场地,他们跑了上海许多地方,也到过外地考察。这一举动引起了政府相关部门的关注。

为了加快这一高端制造数控装备项目的落地,市经信委启动了重大技术装备研制专项。2012年6月,市领导前往拓璞公司调研。

同年9月,市科委拨款,在公司筹建“上海特种数控装备及工艺工程技术研究中心”,并启动重大科技攻关项目。闵行区科委也给予其重点项目支持。

很快,占地1.8万平方米、总投资2亿元的一座现代化高标准重装厂房,在光华路888号的莘庄工业区内拔地而起。拓璞团队只花了200万元就实现“拎包入住”,且被告知三年内免付租金。毕庆贞说:“这对初创团队非常重要,因为一开始公司的研发费用占总支出的30%以上,至今仍保持着20%的占比。”入驻“新家”后仅一年,拓璞就拿到1.9亿元的市场订单,形势喜人。

壮士断腕砍掉90%产品线,深耕关键技术叩开高端机床市场大门

2019年,拓璞数控员工队伍从120人扩容至480多人,公司推出了精密机械传动、开放式高档数控系统和先进制造工艺三大技术平台,同时运行的产品线达100多个。

然而,危机却暗藏其中。“我们一直秉持‘不在现场就没有发言权’的原则,要求管理人员长期驻扎一线,但随着产品线增多,有经验

的管理人员慢慢不够用了,新培养的管理人员有时无法敏锐地解决现场问题。慢慢地,延期交货现象越来越多,产品口碑也在下滑,最后竟遭遇了管理体系的崩溃。”回忆那一段经历,王宇哈无比痛心。

危急时刻,拓璞团队以壮士断腕的决心砍掉了占比高达90%的非标准产品线,重建流程化体系,重申“不到现场就没有发言权”。在公司的产品综合手册里,他们把“两小时内响应,24小时到达客户现场”作为开卷第一条。

2021年是卧式航空镜像铣规模化应用的开始。由于客户应用工况特殊,其核心厚度指标较常规提升五倍以上,在面积-厚度比高达800万的薄壁零件上,这是一项难度系数呈几何级增加的挑战。

55岁的王宇哈带领团队驻扎现场,连续两个月与项目团队一起奋战至凌晨两点。11月初的某个凌晨一点,设备在加工蒙皮的过程中突然出现控制异常,王宇哈在观察后迅速作出判断,原来是新定制的聚晶金刚石刀具质量不稳定,更换新刀具后,加工质量马上稳定下来。

“这段经历提醒我们,做企业一定要专注于自己的专业方向,不要看到哪个东西赚钱了就去。只有不忘初心,在一个地方深扎下去,才可能结出更大的果实。”王宇哈说。

拥有核心技术的硬科技产品终于响应当地叩开了市场大门。拓璞团队的镜像铣设备研制成功后,一举占据全部镜像铣装备市场,截至目前已销售25台,销售额达7.7亿元。拓璞也一跃成为高端机床销售额全国第一的企业。

在25台镜像铣设备中,12台交付给了飞机蒙皮生产线。新工艺引进后,原先需要20多道工序、应用数十种化学药剂的流水线,如今可由镜像铣机床一次完成。中国工程院院士、C919总设计师吴光辉对此竖起了大拇指。他认为,镜像铣技术为国产大飞机的研制与批量生产提供了关键支撑。要知道,一张蒙皮的价值达200多万元,而一架大飞机上有200多张这样的蒙皮。

2021年前,镜像铣制造的火箭箱底只应用于少数型号上。随着镜像铣箱底数倍于传统化铣工艺的承压能力得到认可,拓璞公司接到的镜像铣箱底制造订单也开始爆发式增长,有望成为公司未来的增长点。

从基础研究出发,做一家闯荡高端装备“无人区”的伟大公司

如果让王宇哈传授一项创业成功的关键秘诀,他的答案始终不变,就是基础研究。“基础研究是一切的基础。”他说,“镜像铣的最大突破是基础理论的突破,我们的论文都作为机械学科国际顶刊《国际机床与制造杂志》的封面文章发表。”

团队在大量算法尝试与验证的基础上,发明了针对柔性零件的镜像铣柔性编程加工工艺方法,创造性地提出了基于测地线数解算的曲面等距映射匹配方法,匹配精度较刚性工件匹配方法提高10倍,实现了柔性曲面上零件轮廓的精确加工。

对于未来,拓璞的目标清晰而坚定——坚持自主创新,闯荡巨头林立的全球高端装备制造市场,在中国高端装备“无人区”中创造一家伟大的公司,而不仅仅是做一家会赚钱的民企。

钟磊表示,高端装备制造业发展需要设计、控制、软件和工艺“四足鼎立”。过去,中国制造“缺条腿”,其中作为工业母机的数控机床是根本性的短板。“很多时候,我国装备制造与国际尖端的差距,往往就在一台五轴数控机床。”

比如,想要制造发动机叶轮、叶片、船用螺旋桨等零部件,五轴机床是唯一的加工手段。美国、日本、德国等制造业强国在上世纪80年代已经拥有,而我国在高端精密加工机床领域一直落后。没有高端机床,就没有会使用高端机床的人才,造出的零件精密程度就落后于人,无法实现产业升级。

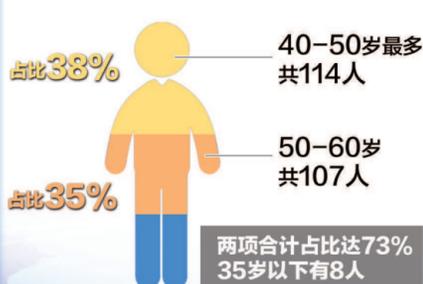
“现在,我们的五轴机床精度完全可以和德国、日本掰手腕,相信在国内庞大的应用需求牵引下,高端装备制造上的突破值得期待。”拓璞公司总产品线总监陈昊说。

在有可能实现弯道超车、换道超车的汽车工业领域,拓璞已面向市场推出五轴车铣复合加工中心i500。据介绍,这是一台可实现任意角度钻孔、攻丝和端铣的高精度五轴数控机床,可实现复杂零件一道工序成型,加工精度达到2微米,相当于头发丝的1/50。

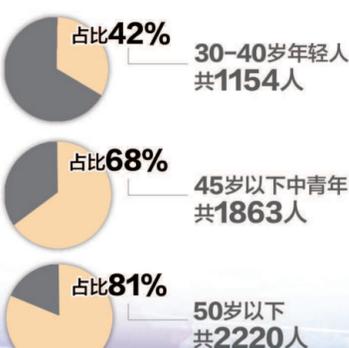
2022年度上海市科学技术奖

项目完成人(中青年是科技创新中坚力量)

第一完成人:



所有完成人:



项目完成单位(企业创新主体作用凸显)

303项获奖项目中

