

# 人机协作标准及应用动态研究

邹方<sup>1,2</sup>

(1. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024;

2. 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

**[摘要]** 通过对人机协作内涵定义以及人机协作安全标准的叙述,提出了人机协作需要攻克的各项关键技术,点评了4款著名协作型机器人的功能,介绍了国外协作性机器人在飞机装配中的最新研究成果,最后对人与机器人协作将成为装配系统的新常态进行了展望。

**关键词:** 人机协作; 自动化等级; 人机安全; 人机共融

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.058



邹方

自然科学研究员,中航工业基础院工艺装备电气控制技术首席专家,北京航空制造工程研究所数字化制造与柔性装配技术研究室副主任。主持研制了我国首台具有完全自主知识产权的“柔性多点拉形模具”,获国防发明专利6项;开展多种专用设备和系统研制,曾获部级科学技术进步一、二等奖。目前致力数字化柔性装配的基础研究和工程化应用工作。

人类从事产品和工具制造已经有几千年的历史了,要经历3种境界:第一境界:人,全是人;第二境界:机器,全是机器;第三境界:人机和谐,相互依存。飞机装配涉及到大量人工劳动,实行并行作业,保证产能需求。早期飞机装配始终围绕人的能力来安排。应用自动化的一个重要的障碍就是,为了人身安全,将人与机器隔开,将机器人禁锢在牢笼里。

工业化的大生产时代,人们对某一物品的需求量可达到上百万件。为了提高产能,一般采用流水线的生产方式。根据产品制造工艺要求,设计制造了大量的专用工艺设备和固定工装系统,生产前进行了一到几年的准备。安排了编程、仿真、专机、工装、生产线等工作,产品上线后可以工作几十年,获利上百亿。然而经过工业社会百年来的发展,航空航天的飞行器生产制造业迎来了前所未有的挑战,如:大型/个性化部件、价格压力加剧、多品种/小批量、高质量要求(平均寿命20年)等。

当今全球产品制造模式发生了根本的变化,慢慢向多品种小批量的生产模式转变,即大量个性化生产、

大量保养维护,因此不可能制造那么多的专机和固定工装,生产制造快速转型换代势在必行。

人与机器优势对比见表1<sup>[1]</sup>。

从表1明显可以看出,要达到最优的制造生产效果,必须将人与机器的优势结合起来,即人的“知识、分析、决策”能力,与机器的“力量、精度、可重复性”结合在一起。同时,人与机器要和谐相处,也必须开发新一代协作型机器人(CO-ROBOT),达到如下目的:

(1) 帮助人类改善工作条件,防止人类肌肉骨骼伤害,保护人类免受有害环境伤害。

(2) 改善人类的生产力,使人类致力于与高附加值的任务。以适当

表1 人类与机器的优势对比

人类	机器
灵敏的视觉、听觉、嗅觉和味觉	快速响应,精准发力
遍布全身的触觉	重复执行任务能力
随机应变、灵活处置	短暂存储、快速擦除
长段存储、回忆联想	演绎推理、超强计算
原因归纳、自我学习	操作高复杂、并行多任务

的方式成为人类的一部分,使人类可以专注于精密装配作业。

## 人机协作

当前全球制造业遇到了前所未有的挑战,如人口老龄化、专业人员缺乏、劳动力成本高、成本有效性、质量提升和新产品开发等。产品的个性化成为驱动“人机协作”的主要推动力,对于产品的装配而言,装配生产采取了“手工装配”、“自动装配”、“人机装配”3种模式,从产品数量、品种型号、工作柔性、产能4个维度,可以总结出它们的特点(见表2)。

表2 3种装配模式的特征

装配模式	产品数量	产品种类	工作柔性	生产效能
手工装配	少	多	高	低
自动装配	多	少	低	高
人机装配	中	中	中	中

人机协作存在5大动机:解除隔离保护、避免人身伤害、增加自动化灵活性、合并人机优势、提高质/效/能。那么需要开展一系列的技术工作,如研制辅助协作机器人,开发安全人机协作新技术,实现直觉化人机交互。要研发协作式机器人主要动机有如下3个方面:

(1)传统工业机器人“单打独斗”发展为协作工业机器人“团队作战”;

(2)从“隔离式安全”的不协作、不接触,过渡为“监管式安全”的部分协作、谨慎接触,最后实现“自主式安全”的全面协作、零距离接触;

(3)全机器人生产制造模式,其灵活性有限,成本太高;人和机器人发挥各自优势,协作完成生产制造任务,其灵活性高,价格适中。

### 1 人机协作的定义

“人机协作”关系是人类和机器在统一时空的交联作业,它们共享时空资源。如果人机两个个体满足下面最小化两个条件,就认为它们处于协作状态<sup>[2]</sup>:

(1)一方朝着自身目标努力时,可能会干扰另一方的工作过程、资源使用和目标实现等。

(2)双方企图管控干扰和分歧,促进各自个体活动和共有任务的完成。国外学者 Sheridan1980年对机器人的自动化等级进行了10级划分<sup>[3]</sup>:

(1)人类考虑一个备选方案,作出并实施决策;

(2)电脑提供了一组人类可能会忽视决策的备选方案;

(3)电脑提供了一组限制性选择,由人类决定并实施;

(4)电脑提供了一组限制性选择和建议,由人类最终决定;

(5)电脑提供了一组限制性选择和建议,人类许可电脑,它就实施;

(6)电脑作出决定,在实施前,给人类否决权;

(7)电脑作出决定并实施,但必须事后通知人类;

(8)电脑作出决定并实施,只有人类要求才通知人类;

(9)电脑作出决定并实施,只有感觉必要才通知人类;

(10)电脑凭感觉决定并实施,只有感觉必要才通知人类。

人机协作系统的合作分为5个层次,分别为意图识别、合作模式、任务分配、人机接口、交流接触。

人机协作经历不接触、可能接

触、有意识接触3个阶段,其协作等级不断增强,如图1<sup>[4-5]</sup>。最低级的协作是安装防护栅栏,人与机器不能接触,其工作空间是分割开的;到虽然没安装护栏,但有感应安全防护,如光栅,可进行无意识接触;到最高级别,人与机器共享工作空间,机器人可以移动,与人进行有意识接触。

根据人机作业中危险降低和工效改善的测定,划分人机安全等级,如表3<sup>[4-5]</sup>,其级别越高,安全性越好。

### 2 人机协作标准

为了人机安全,国际上制定了有关“协同作业类型”的安全标准(ISO 10218, ISO/TS 15066),在机器人引导、人进入机器人作业区、人与机器碰撞、机器人搬运等方面,对人机安全作出了明确的规定,见表4<sup>[4-5]</sup>。

人机协作的几个实例如下所述。

(1)定点安全监控停止(ISO 10218-1, 5.10.2; ISO/TS 15066)。

当机器人发生故障或人在协作区时,通过监视和停止来确保机器人静止,以便降低人身伤害的风险(图2)。监视静止,2级停止(IEC 60204-1);发生故障,0级停止(IEC 60204-1)。

(2)人手引导(ISO 10218-1, 5.10.3; ISO/TS 15066)。

人牵引机器人来控制机器人运动,可以通过急停、运动使能来降低

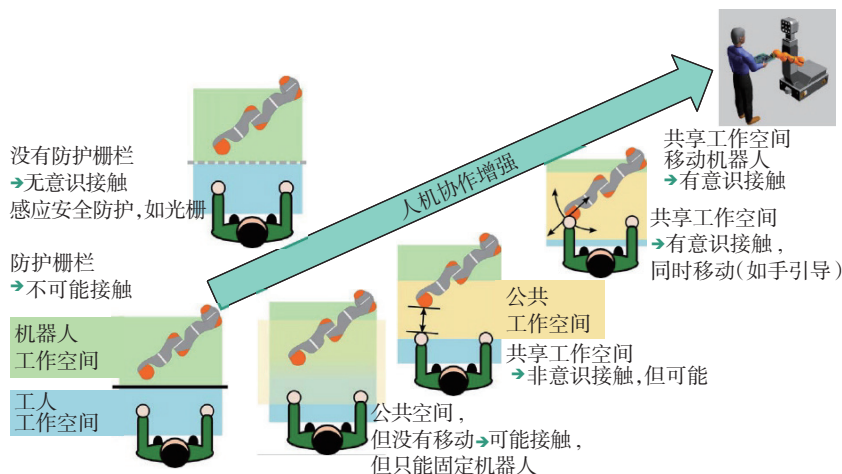


图1 人机协作等级

Fig.1 Level of human-robot cooperation

表3 人机安全级别划分

等级	状态描述
6级	实时感知适应环境
5级	人身保护设备
4级	软垫碰撞检测,手动回撤
3级	功率和速度限制
2级	机械设计和软垫,避免伤害
1级	低负载和低机器人惯性

人身伤害风险(图3)。即:紧急停止(接近末端执行器控制);使能装置(接近末端执行器控制)。

(3) 速度和距离监控(ISO 10218-1, 5.10.4; ISO/TS 15066)。

人与机器人作业时,通过维持协作区人和机器人之间的足够距离,监视机器人的速度,来降低人身伤害风险,可通过4点来实现:一是距离、速度监控;二是违反了最小分离距离和限定速度,机器人实行保护停止;三是最小分离距离要充分考虑制动距离;四是设置安全相机系统。

(4) 功率和力量的限制(ISO 10218-1, 5.10.5; ISO/TS 15066)。

移动机器人、末端执行器或工件工作时,通过对人体部位接触的机械负荷限制,来降低人身伤害的风险(图4)。可采取低惯性、合适外形和材料、传感、控制功能或综合考虑瞬间动态与相对静态的物理接触。

### 欧盟4大“人机协作”科技计划

人机协作在欧联盟第7支撑框架资助下,自2006年开展了4大科技计划<sup>[6-9]</sup>:(1)PISA(2006~2010)时空共享;(2)ROSETTA(2009~2013)自然沟通;(3)VALERI(2011~2015)移动协助;(4)Robo-Mate(2013~2016)穿戴力量。它们有时间长、力度大、单位多、领域广、成果多的特点。

#### 1 PISA: 柔性装配系统通过场所和时间共享,实现人机协作

表4 协同作业类型

ISO 10218-1 条款	协作交互类型	减少风险主要措施
5.10.2	定点安全监控(如手动装卸站)	人在协作区,机器人不动
5.10.3	人手引导(如操作者作为辅助角色)	只有操作人员直接引导下机器人才能移动
5.10.4	速度和距离监视(如往容器中填充零件)	当隔离距离大于最小的隔离距离时,机器人移动
5.10.5	设计/控制中考虑功率和力的限制(如ABB YuMi <sup>®</sup> 协作装配机器人)	在人机接触中,机器人只能传递有限静态和动态力

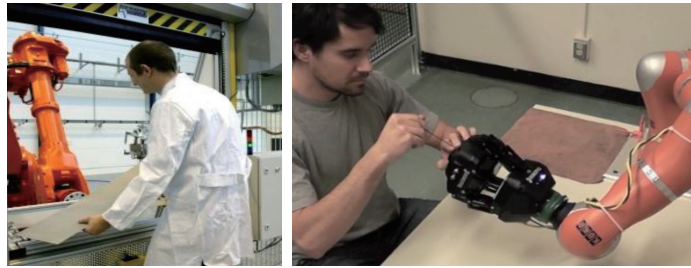


图2 定点安全监控停止

Fig.2 Safety-rated monitored stop



图3 速度和距离监控

Fig.3 Speed and separation monitoring

该项目共有18家合作伙伴,其中4家工业公司(VW、COMAU等)、7家中小型企业(Senur Elektrik等)、7家大学研究所(Fraunhofer IPA等),其总目标为人类始终要参与到工作中来,但需要用强大的工具来武装他们。PISA项目共规划了9个子项目,突破了如下3大技术:(1)智能辅助系统(IAS);(2)系统集成规划工具;(3)装配设备的重构和重用性。

#### 2 ROSETTA计划

该计划由ABB公司承担,总经费1000万欧元。其目标是基于自治、知识累积和自我学习,与人类自然交互熟练完成任务的机器人控制技术。它基于第7框架计划,FP7/2007-2013(No230902)挑战2:认知系统、交互、机器人技术。研究内容如下:(1)基于安全仿真,满足DACR;(2)

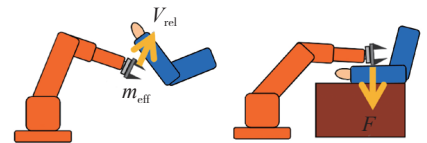


图4 限制功率和力量

Fig.4 Power and force limiting

视觉操作跟踪;(3)以人为中心的机器人运动;(4)任务导向装配任务离线编程;(5)网络化、自学习装配机器人;(6)基于网络语义的生产知识库。

#### 3 VALERI先进协作机器人的工业应用验证

该计划由欧盟第7框架计划资助,按照拨款协议进行研究、技术开发和示范(NO314774),其项目动机是开发和验证一个移动机械手协助人类完成航空航天生产任务。合作伙伴有Fraunhofer、KUKA、Airbus等7家单位。实现工具安全防护的视觉空间监测,并将机器视觉合并到移动系统,在移动机器人上安装了安全和触觉交互的触觉传感器(图5)。

#### 4 Robo-Mate可穿戴外骨骼

项目总经费为580万欧元,有12家合作单位,项目目标如下:

- (1) 开发一个界面友好的智能

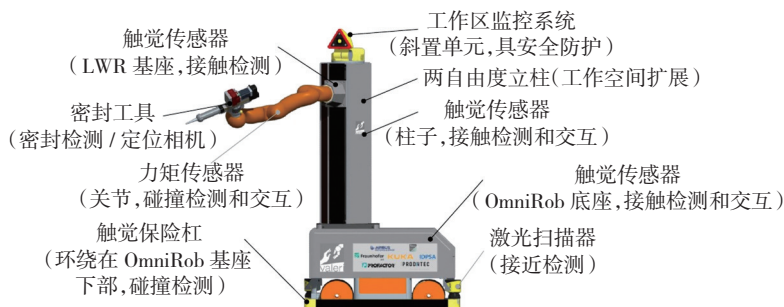


图5 安全触觉传感器  
Fig.5 Safety tactile sensor

协作轻量可穿戴人外骨骼,手动处理不同的行业工作;

(2)该设备在半天内完成部署,不需要特定的编程,开发的外骨骼具有高度灵活性,可直接使用在手工、批量生产或辅助流程中;

(3)提高负载的工作条件,促进重复吊装任务,从而减少工作场所相关的损伤和疾病的发病率。

Robo-Mate 外骨骼由一系列支撑手臂、躯干和腿的模块组成(图6)。手臂模块积极支撑佩戴者的手臂和手臂模块,提重物时感觉只有真正重量的 1/10。附着在手臂模块的是主干模块,它支持背部和脊柱,防止扭曲或椎间盘突出。腿部模块支持大腿内侧,像一个蹲着的座位,所以持有负载不需要额外力量。

### 人机协作的关键技术

要解决好人类与机器人的共同协作,必须从机构设计、多维感知、场所监视、规划测试 4 个方面进行关键技术攻关。

(1)机构设计:仿生象鼻子、轻型机器人、机器皮肤、柔性爪钳。(2)多维感知:嵌入机器人触觉传感器、



图6 Robo-Mate外骨骼工作  
Fig.6 Robo-Mate external skeleton work

接近检测的电容传感器、空间精度的压敏地毯。(3)场所监视:投影和相机系统、全防护区在线规划、动态安全区规划、安全防护工具。(4)规划测试:碰撞测试、增强现实环境、人机交互单元规划。

### 1 机构设计

发展仿生设计,进行类人和双手设计,开发弹性皮肤与柔软结构等。如象鼻子仿生,采用 3D 打印来制造象鼻子,它具有高柔性、低密度(0.94g/cm<sup>3</sup>)等优点,见图 7。

### 2 多维感知

通过视觉测距定位、敏感皮肤、测距传感器等多种感知方法,来实现对人机协作环境的多维感知。

(1)视觉测距法。

为厂房、仓库、实验室和家庭环境的移动系统开发的视觉测距/视

觉定位集成装置,采用单目自定位和映射的映射导航(SLAM),结合自然和人工的地标作为参考点。

(2)压敏机器人皮肤、混合机器人皮肤。

适形触觉传感器用于碰撞和接近检测,进行碰撞检测和触觉反应,可实现吸振的安全碰撞检测(图 8)。

(3)距离检测的电容式传感器。

忽略工作区中静态对象,其过程和工作区改变时,采用距离检测传感器对进入视线物体的相对测量,可一次性记录过程和设置传感器数据,检测有生命危险的身体部位到达的距离,同时机器人与之前定义的绝对值连续匹配操作,并考虑安全距离进行机器人速度限制(图 9)。

### 3 场所监视

采用投影和相机来监测工作空间,生成并监控安全工作区,安全区直接投射到环境中,投影光束一旦受干扰,安全区就会引发危险报警。采用了“硬安全+软安全”的双保险模式,非可见安全区域使用近红外光,检测出入工作区的对象,支持安全区形状、位置和大小动态变化。

## 国外机器人发展概况

### 1 协作机器人的开发

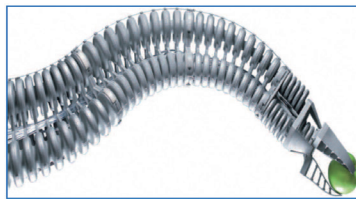


图7 象鼻子机器人  
Fig.7 Elephant nose robot

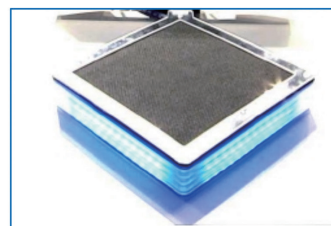


图8 敏感混合皮肤  
Fig.8 Sensitive skin

以往自动化是以机械代替人工并降低人力成本,而协作型机器人旨在协助人类并与人类一同作业,且无需使用安全围栏进行隔离,解决人类较难以达成的精确度或让人类远离危险的环境和工作。协作机器人具有协作性、安全性、快速学习、适应能力强、高效和低成本等特点。目前,协作机器人所具有的优势正在打破传统机器人的桎梏,在追求低价、高效、安全和生产多样化的今天或将掀起一场制造业机器换人的风暴。

据国外相关统计数据显示,2014年,协作机器人市场规模约为1亿美元,目前正以每年50%的速度增长。预计到2020年,机器人将形成“人机共融”的新局面。目前国际上,主要有4家公司在进行协作型机器人的研发(表5和图10)<sup>[10-13]</sup>。

(1) Rethink Robotics 公司协作机器人 Baxter/Sawyer ;(2) ABB 公司首款人机协作机器人 YuMi ;(3) 优傲机器人公司的全系列协作机器人 UR3/RU5/UR10 ;(4) KUKA 公司协作机器人 LBR iiwa。

## 2 在航空制造中的应用

由于飞机产量巨增,建设了一些生产线,可以负担这种高强度的投资,实施了许多自动化系统。但从研发的角度来看,应该关注如何降低采购成本和实施时间。但是,许多现有的自主机器人并不适宜大多数装配,如机身和机翼的装配。飞机生产线引入仿人机器人,将员工从最辛苦和危险的劳动中解放出来,使他们专注于高附加值的劳动。由于飞机尺寸大,仿照汽车行业使用固定式专业机器人在航空行业行不通。即使机器人可以移动基座和机械臂,其能力有限,不能爬楼梯、梯子、跨越地面障碍等。目前主要困难是机器人在密闭环境中,不能与周围的众多对象发生碰撞。必须解决的第一个问题是开发新的规划和控制算法,实现机器人精确运动。

表5 4种协作机器人性能对比

比较项	UR3	YuMi	Sawyer	LBR iiwa
厂家	UR	ABB	Rethink Robotics	KUKA
特点	单臂	双臂	单臂	单臂
自由度	6	14 (7×2)	7	7
单臂负载 /kg	3	0.5	4	7
重复精度 /mm	0.2	0.02	0.1	± 0.1
臂伸展半径 /mm	500	559	1260	800
底座面积	118mm × 118mm	399mm × 497mm	680mm × 770mm	136mm × 136mm
重量 /kg	11	38	19	23.9
防护等级	IP64	IP30	IP54	IP54

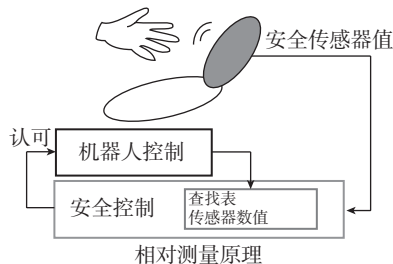


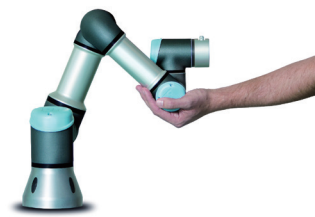
图9 相对测量原理

Fig.9 Principle of relative measurement

(1) 空客公司采用双臂机器人制孔<sup>[14-15]</sup>。

FuturAssy 是一个正在研究的人机互动的双臂机器人应用项目,旨在创造一些基本技术模块,用于未来空客公司标准机器人工作单元中(图11)。目前许多自动化单元完成了里程碑部署,如固定机器人单元和自治机器人平台,但它们与人类交互非常有限。这些系统可以移动到大型结构件周围,稍微调整移动规划达到非装卡的工件。但这种类型的系统是昂贵的,需要一个高度熟练的工人来维护。第一台人机互动双臂机器已经被部署用在 A380 舵翼梁装配站中。系统还将用于非增值工作,如孔去毛刺、处理肋骨和其他轻型部件。

优傲 UR5 和 UR10、KUKA LBR iiwa 协作机器人也在测试。技术进步正推动模块化设计、中性接口和标准工作流程。通过允许重用现有飞机装配模块,来削减开发成本和时



(a) UR (优傲)



(b) YuMi® (ABB)



(c) Sawyer (Rethink Robotics)



(d) LBR iiwa (KUKA)

图10 4大协作机器人  
Fig.10 Four cooperative robots

间。人机综合系统将提高工效学性能,促进了自动化系统的广泛应用,机器人帮助人类消除非增值的费力操作,高级员工不再参与这类工作。

(2)空客公司致力于多触点类人机器人研制<sup>[16]</sup>。

2004年,法日创建了机器人联合实验室(CNRS/AIST)。2014年,实验室和空客推出了新的联合研究计划,旨在开发专门为航空制造设计的类人机器人,部署在飞机装配线上。鉴于飞机装配的特殊性,空客提出机器人必须能够穿越狭窄空间,如机身,可以模仿人类动作如跪行和斜靠,从不同的位置执行更复杂的功能,如制孔、拧紧、安装等作业。联合机器人实验室通过HRP-2和HRP-4机器人模型,开发了多触点运动新技术,利用其整个身体接触环境。该机器人可以爬上梯子,进入密闭空间。多个接触点增加了机器人的稳定性,可以促使它执行一个任务(图12)。此外,这些机器人提供了更大的通用性,拟人形式在不同环境中执行许多不同的任务。

多触点类人机器人可以在组装厂安全移动,不会危及人类工人、飞机和自己。可以执行简单的任务,比如搬运一个物体到一个特定的位置。更复杂的运动需要改进机器人控制和规划。如攀岩,必须事先考虑通过识别可能的脚和抓手,并决定哪些运动和序列,这是规划功能。面对突发事件(如打滑或突发大风),具有特殊的控制功能,使登山者实时调整其运动。目前正在使用数值优化技术和先进的算法来提高其能力。

结合日方硬件和法方算法,在机器人设计、触觉以及触觉感知方面取得了初步进展。在此基础上开发了多触点运动,使类人机器人可以使用它们的脚和其他身体部位如手肘、膝盖和手,可以像人类那样爬行。

联合机器人实验室和空客集团还合作了一个4年研究项目:开发



图11 FuturAssy双臂机器人在制孔  
(空客公司)

Fig.11 FuturAssy Dual arm robot is drilling  
(Airbus)



图12 多触点类人机器人

Fig.12 Humanoid robot for multi-contact movement

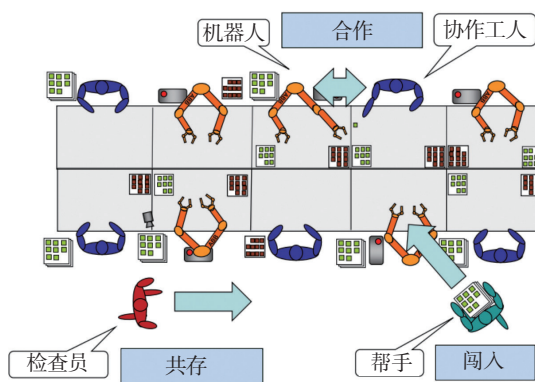


图13 人机共融

Fig.13 Human-robot collaboration

仿人机器人应用于飞机装配现场,执行困难任务。该项目于2016年2月12日正式启动。两家合作旨在使人形机器人在有限封闭环境的装配线执行操作任务,为了完成任务,必须协调利用它们的身体。这些狭小空间需要特定的姿势,这种姿势的计算在数学上是复杂的,必须有首先开发比有技术手段更强大的新算法,同时为了机器人保证有效的运动,必须有足够快的计算速度。机器人完成的典型任务包括在飞机的结构件拧紧螺栓、清除金属屑、插入零件。

这些算法要测试一组来自空客集团的不同机构的需求(民航、直升机和航天)的场景。除了新算法研究,合作重点解决当前机器人的缺陷(例如结构设计、定位精度和运行电源),未来10~15年,将致力于飞机大型机身结构装配的仿人机器人规范。

## 展望

人类的生产经历了全手工劳动,

到半自动,到全自动等生产模式,未来必将走进人与机器人的协作时代,并且成为一种常态的工作模式。今天,可能只在生产线的上下料等上下游使用机器人,在装配过程中,采用手工来装配,配合输送带系统,追求单元的精益生产。未来,在生产线上,人与机器人将实现混合搭配,协作型机器人将使用多功能的爪钳,采用引导式的高效编程,提高整个装配系统成本竞争力(图13)。7自由度运动学冗余机械手与人类一起工作,它们紧凑运动不扰乱工人工作。在人机的工作分配方面,将简单重复、劳动强度大的劳动留给机器人,复杂的智力劳动留给人类自己。

(1)人机友好协作。

自动化过程仍然需要人,人作为解决方案的一部分,现有的技术不能完全自动化。一个完整的人机协作系统具有更简单的编程,意味着工厂不需要许多工程资源。

(下转第76页)