

可转位刀片刀尖圆弧磨削成形的误差分析及补偿技术

罗琪, 姚斌, 朱健, 吕颖, 王舒阳

厦门大学

摘要: 用于可转位刀片周边刃磨的机床、夹具、数控系统的工作性能等都会影响可转位刀片刀尖圆弧加工质量。通过分析机床伺服系统特性误差、进给轴换向间隙对刀尖圆弧轮廓形状和圆弧半径尺寸的影响,提出了一种在调整数控机床螺补后基于刀尖圆弧制造误差的加工指令再设计补偿新算法,经磨削试验验证了补偿算法的技术适用性。

关键词: 可转位刀片; 磨削; 轮廓形状精度; 补偿算法

中图分类号: TG580.6; TB391

文献标志码: A

Grinding Error Analysis and Compensation Technology on Tip Arc of Indexable Inserts

Luo Qi, Yao Bin, Zhu Jian, Lv Ying, Wang Shuyang

Abstract: Performance of the machine tools, fixtures and CNC system used on indexable inserts periphery grinding will affect the arc transition edge processing quality of the tool nose. This paper put forward a new compensation algorithm of manufacturing instructions based on analyzing the influence of machine tool servo system error and the opposite clearance error on arc contour and radius. Finally, this method had been validated to be practical by experiment.

Keywords: indexable inserts; grinding; contour accuracy; compensation algorithm

1 引言

在可转位刀片的主、副切削刃之间采用圆弧过渡形成刀尖圆弧,可提高刀片的耐用度,同时保证切削对系统刚度的良好适应。刀尖圆弧半径大小对已加工表面的残留面积高度有直接影响^[1],故在实际加工中应选用不同的型号来满足不同进给量与已加工表面粗糙度的匹配要求。刀尖圆弧半径通常有0.4、0.8、1.2等,甚至还有0.2的超小尺寸。然而,小半径刀尖圆弧的市场需求对此类可转位刀片的磨削成形提出了更高的要求。保证可转位刀片刀尖圆弧的形状精度、尺寸精度,对于刀片投入使用时提高被加工工件的加工质量具有实际意义。

提高数控机床加工精度的基本方法有两种:误差防止法和误差补偿法^[2]。误差防止法依靠提高机床设计、制造等机械部件精度及其安装精度,即通过提高机床本身精度来满足机械加工精度的要求。由于加工精度的提高受制于机床精度,因此该方法存在很大的局限性,经济代价昂贵。误差补偿法主要利用数学模型及软件控制技术,人为地造出一种新误差去抵消或削弱当前成为问题的原始误差。误差补偿法对机床精度要求相对较低,且投入成本低,但这种方法存在误差补偿运动控制难以实现、数控

机床误差的综合建模不够准确、机床误差检测和辨识时间过长、误差补偿的鲁棒性不高技术难点^[3]。为此,本文提出了一种基于刀尖圆弧制造误差的加工指令再设计的补偿方法。

2 可转位刀片刀尖圆弧的磨削成形理论

图1所示为可转位刀片磨削过程中各轴的运动关系。X轴为直线进给轴,B轴和C轴为刀片磨削姿态调整轴,A轴为主轴。金刚石砂轮绕A轴旋转,沿X方向进给加工。在刀片的磨削过程中,通过X轴、B轴、C轴三轴的联动可实现刀片直线边刃、圆弧过渡刃等加工。

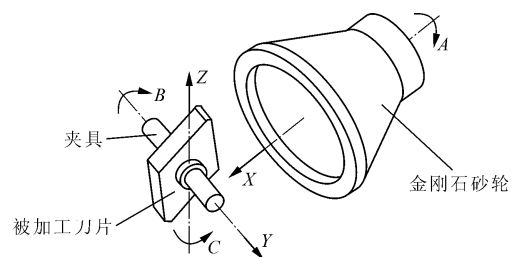


图1 可转位刀片周边磨床各轴示意图

文献[4]提出了一种磨削圆弧过渡刃的数学模型。如图2所示, λ 为总径向角; S 为刀尖圆弧圆心到刀片装夹点的距离; ω 为直线段 S 与初始加工边刃的夹角; r 为刀尖圆弧半径; θ 为联动时B轴的旋转角度; Z 为C轴回转中心至机床零点在X方向上的距离(称作机床Z值); α 为刀片后角。由以上参

基金项目: 福建省产学研重大项目(2014H6025)
收稿日期: 2015年5月

数可得出加工刀尖圆弧的数学模型为^[4]

$$\begin{cases} S = \sqrt{(L_1 - r)^2 + ((L_2 - r) \csc \lambda - (L_1 - r) \cot \lambda)^2} \\ \omega = \arctan\left(\frac{L_2 - r}{L_1 - r} \sin \lambda - \cot \lambda\right) \\ X = Z - [S \cos(\omega - \theta) + r] \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

后文的误差补偿方法基于此模型。

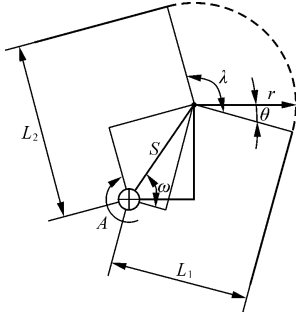


图2 刀尖圆弧各参数的几何关系示意图

3 可转位刀片刀尖圆弧成形的误差分析

复杂曲面五轴数控加工过程中,加工误差分析是控制加工表面质量和提高加工效率的关键^[5]。工艺系统的制造误差、编程计算误差、刀具与被加工工件的几何运动误差、热变形误差等都是引起加工误差的因素。分析可转位刀片刀尖圆弧的加工误差对于提高刀片的加工质量具有重要意义。针对实际磨削成形中可转位刀片存在的形状畸形、轮廓偏移、尺寸不符等缺陷,本文主要从机床的伺服系统特性、进给轴换向间隙这两方面因素展开研究。

3.1 数控机床伺服系统特性引起的形状误差

在进行连续切削加工的数控机床闭环系统中,各轴一般要求随加工形状的不同瞬时启停或改变速度,控制系统应同时精确地控制各坐标运动的位置与速度^[6]。数控系统的稳态和动态特性影响着各轴联动匹配度以及位置精确性,从而影响被加工工件的轮廓形状精度。为了保证较高的轮廓形状精度,就必须要求机床有较高的定位精度、良好的动态响应特性,即保证系统的轮廓跟随误差在允许范围内。

系统的轮廓跟随误差主要与各轴进给速度、各轴系统增益、加工圆弧半径、系统增益有关。位置环增益 k_v 是数控机床伺服进给系统的重要参数。 k_v 越大,响应越快,位置控制精度越高。位置环增益与跟随误差 e 的关系为^[4]

$$e = v/k_v \quad (2)$$

式中 v 为进给速度。

一般而言,联动轴需设置相同的位置环增益才

能达到较高匹配度。故加工理论轮廓时,设置 X 轴、 B 轴伺服位置环增益相同,将跟随误差分解到被加工刀片刀尖圆弧外形轮廓的 X 、 Y 方向上得到误差 e_1 、 e_2 。如图3所示, S 点为加工起点; t 时刻,砂轮与刀片按理论计算应相切于 A 点,速度方向沿 l_1 方向;但由于伺服系统存在跟随误差,砂轮 t 时刻实际沿 l_1' 方向运动至 A' 点。因理论轮廓形状为圆形,设半径为 r ,而实际轮廓非圆,此处近似处理为半径为 R 的圆形,则在 t 时刻的轮廓形状误差为

$$\Delta r = R - r \quad (3)$$

由图3可知

$$R^2 = r^2 + (AA')^2 \quad (4)$$

$$(r + \Delta r)^2 = r^2 + (e_1^2 + e_2^2) \quad (5)$$

由式(1)可得: $e_1 = v_1/k_v$, $e_2 = v_2/k_v$, 且 $v_1^2 + v_2^2 = v^2$ 将其代入式(5)可得

$$\Delta r = \frac{v^2}{(\Delta r + 2r)k_v^2} \approx \frac{v^2}{2rk_v^2} \quad (6)$$

由式(6)可知,形状误差与增益的平方、刀尖圆弧半径成反比,与进给速度的平方成正比。故被加工刀片的刀尖圆弧半径越小,误差会越大。因此在加工小半径刀尖圆弧时适度提高增益、放慢进给速度可减小轮廓形状误差。

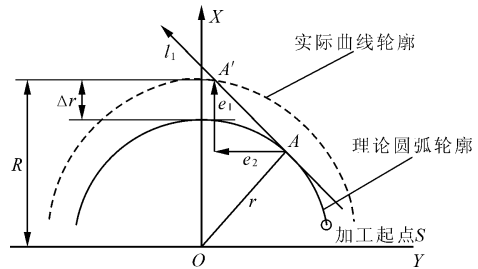


图3 伺服系统跟随误差在 t 时刻造成的圆弧轮廓误差

3.2 换向间隙对刀尖圆弧成形误差的影响

一般而言,进给传动机构由齿轮副、联轴器、滚珠丝杠及支撑轴承等组成。这些机械部件均存在换向间隙。当进给轴在其运动方向上换向时,换向间隙会导致伺服电机空转而无实际位移,称为失动^[7],这是影响机械加工精度的主要因素。若间隙较大,系统的稳定性会明显下降,尤其是被加工的曲面形状精度、尺寸精度都会受到严重影响。此时通常会对机床进行螺补,这种方法确实减小了工件的加工误差。但是螺补之后进给轴仍存在的少量换向间隙无法消除,此时针对普通加工已能满足要求,而对于可转位刀片的高精密磨削而言,少量的换向间隙依旧会影响刀尖圆弧的形状精度,因此还需要进一步研究。

可转位刀片周边磨床的砂轮进给轴 X 轴、工件旋转轴 B 轴在螺补之后仍存在换向间隙。如图 4 所示,带有刀尖圆弧的刀片在磨削加工时,用 l_1 、 l_2 等小直线段拟合成为刀尖圆弧。假设砂轮在 X 轴进给方向上存在换向间隙 e ,旋转轴 B 轴一直单向旋转可不考虑换向间隙,同时假设无其他误差,加工沿图示箭头方向,在磨削刀尖圆弧右半段时砂轮单向进刀形成的直线轨迹准确拟合圆弧周边。但当加工过了圆弧中点 A 之后,砂轮开始退刀,此时换向间隙 e 会影响砂轮走位,在原有磨削代码指令下,砂轮难以准确到达理论终点,造成被加工刀片刀尖圆弧向外凸起形成轮廓形状误差。

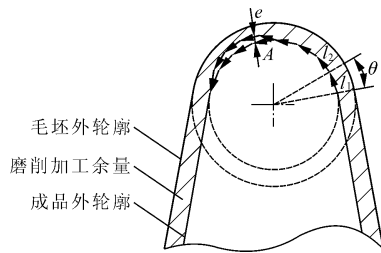


图 4 直线拟合法引起的刀尖圆弧轮廓形状误差

换向间隙引起的误差会随着换向次数的增加而累计。以一对角带有刀尖圆弧的菱形刀片为例,磨削工艺确定先加工四条直线边刃至理论尺寸,再依次加工两头圆弧。砂轮每磨削一条直线边刃就需退刀一次供被加工刀片调整位姿而不被干涉,那么砂轮加工这种菱形刀片累计退刀至少 6 次,误差不断累加,而处于加工工序靠后的圆弧磨削则承担更大的误差,并将此误差体现在形状畸变上。这也能解释实际加工中同一刀片对角的两端圆弧因为加工顺序有先后,所以即使在相同 G 代码指令下,磨削成形的刀尖圆弧形状精度仍不一致。

4 基于刀尖圆弧制造误差的加工指令再设计及试验验证

4.1 形状误差影响因子的几何校正

本文仅分析了伺服系统特性与进给轴换向间隙对刀尖圆弧的单因素影响,针对单因素的误差分析与补偿均容易实现,但实际加工中众多因素共同作用于被加工刀片,这种综合影响造成的加工误差使分析与补偿变得复杂且难以实现。即使最大限度地保证机床、数控系统等外界因素的稳定性与动态特性,但仍不能使加工环境达到理想状态,故文献[4]提出的数学模型不能完全满足加工精度要求。因此,结合上述分析结果以及刀尖圆弧的实际磨削情况,利用数值分析、几何变化等数学方法对理论模型

进行补偿,该方法能够实现刀尖圆弧的高精度磨削,并减小加工质量对外界影响因子的依赖性。

(1) 畸变圆弧轮廓的圆化处理

刀尖圆弧的理论外形是正圆的一段,但实际加工后,刀尖轮廓形状被压缩或拉伸形成畸变,可将其近似处理为椭圆的一部分。为了保证刀尖圆弧的良好圆度,应对其进行补偿。基于 X 轴插补值与 B 轴旋转角度之间的函数关系,定量计算出在每一旋转分度上的半径误差 Δr ,并将其补偿至数学模型中,完成椭圆的圆化处理,补偿畸变的轮廓形状。

建立以刀尖圆弧的圆心为原点的直角坐标系,如图 5 所示, A 点为过渡刃磨削起点, B 点为 t 时刻 B 轴旋转 θ 后砂轮与刀尖圆弧的理论相切点, B' 为实际相切点, λ 为刀片总径向角。设理论圆弧半径为 r ,畸变圆弧的拟合曲线为椭圆,其长半轴、短半轴截距分别为 a 、 b 。则该椭圆曲线的参数方程为

$$\begin{cases} x = a \cos \sigma \\ y = b \sin \sigma \end{cases} \quad (7)$$

在 t 时刻,当 B 轴转过 θ 角度时, r_{OB} 的长度为实际半径

$$r_{OB} = \sqrt{a^2 \cos^2 \sigma + b^2 \sin^2 \sigma} \quad (8)$$

引入中间系数 k_θ ,设椭圆与理论圆的关系为

$$\frac{a}{r} = \frac{r}{b} = k_\theta \quad (9)$$

由图 5 可得

$$\sigma = \theta + \lambda/2 \quad (10)$$

联立式(8)、式(9)和式(10),得出刀尖圆弧半径补偿值为

$$\begin{aligned} \Delta r = r - r_{OB} &= r \left[1 - \sqrt{k^2 \cos^2 \left(\theta + \frac{\lambda}{2} \right) + \frac{1}{k^2} \sin^2 \left(\theta + \frac{\lambda}{2} \right)} \right] \\ &\leq r \left[1 - \sin 2 \left(\theta + \frac{\lambda}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

为简化补偿过程,消去中间变量 k 近似处理 $\Delta r \approx r \left[1 - \sin 2 \left(\theta + \frac{\lambda}{2} \right) \right]$,建立刀尖圆弧半径补偿值与旋转角度 θ 的单变量关系。

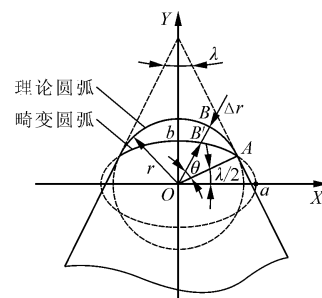


图 5 畸变圆弧轮廓圆化处理

(2) 基于刀尖圆弧制造误差的加工指令再设计

数学模型

加工过程中,回转轴 B 轴与直线轴 X 轴插补运动,建立关于 B 轴旋转角度 θ 与砂轮进给位置 X 的函数关系(见图 6)。那么根据函数图像平移原理,在回转角度上补偿值 $\Delta\theta$,函数曲线图像相位改变并使图像中心线靠近理论中心轴,改善刀尖圆弧中线偏移的情况。对于刀尖圆弧半径失真,可增加幅值修正系数 k。但 k 的取值会影响圆弧半径尺寸精度。

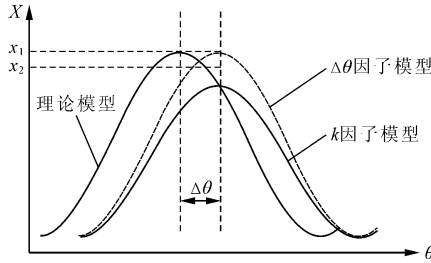


图 6 数学模型的几何变换

结合式(11),补偿后的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \omega = \arctan\left(\frac{L_2 - r + \Delta r}{L_1 - r + \Delta r} \sin\lambda - \cot\lambda\right) \\ S = \sqrt{(L_1 - r + \Delta r)^2 + [(L_2 - r + \Delta r) \csc\lambda - (L_1 - r + \Delta r) \cot\lambda]^2} \\ X = k\{Z - [S \times \cos(\omega - \theta + \Delta\theta) + r + \Delta r] \cos\alpha\} \\ \Delta r = r\left[1 - \sin 2\left(\theta + \frac{\lambda}{2}\right)\right] \end{cases} \quad (12)$$

式(12)较式(1)更为符合可转位刀片的实际磨削工况。由于实际加工环境的复杂性以及测量过程产生的测量误差,一般需要再次或多次补偿才能取得较好的补偿效果,进而实现可转位刀片的高精密磨削。

4.2 可转位刀片刀尖圆弧的磨削试验

以菱形刀片的加工为例,其结构参数为:内切圆直径 9.525mm,刀尖角 35° ,刀尖圆弧半径 0.2mm。四轴联动可转位刀片周边磨床 2MZK7130 的工作参数为:C 轴回转中心至机床零点在 X 方向上的距离机床 Z 值为 84mm;联动轴 X 轴、B 轴位置环增益均为 80 转速均为 2000r/min。第一步,先根据式(1)建立数学模型,并通过磨削成形软件计算得出相应的加工代码,即理论代码。加工成形后刀片刀尖圆弧的投影如图 7 所示;第二步,测量并分析理论代码加工后刀片刀尖圆弧轮廓形状误差。测量数据如表 1 所示。

对表 1 的数据进行分析,可以得出以下结论:理论代码磨削的刀尖圆弧半径偏大,且中心线左移,圆心位于理论圆心左下方。因此,第三步对理论代码进行补偿,增加半径补偿变量 Δr ,取 $k = 0.8$, $\Delta\theta =$

0.07,补偿后通过磨削成形软件生成 G 代码用于加工,成形刀尖圆弧投影见图 8。

表 1 理论代码加工的刀片刀尖圆弧数据

序号	圆弧半径 (mm)	轮廓描述	序号	圆弧半径 (mm)	轮廓描述
1	0.231	中线左倾;圆弧轮廓外凸程度大	6	0.255	中线左倾;圆弧轮廓外凸程度大
2	0.236		7	0.259	
3	0.240		8	0.264	
4	0.244		9	0.268	
5	0.249		10	0.274	

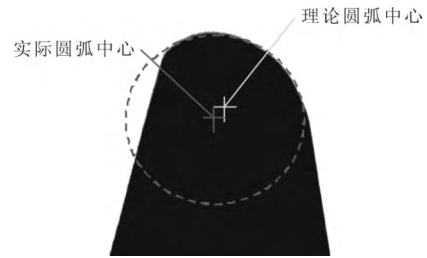


图 7 理论代码加工的刀尖圆弧投影

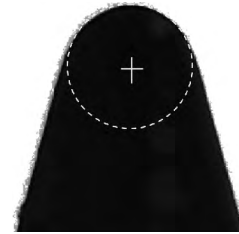


图 8 补偿后加工的刀尖圆弧投影

第四步,基于刀尖圆弧制造误差的加工指令再设计后,通过可转位刀片磨削软件生成补偿代码用于加工。测量加工后的刀片刀尖圆弧参数见表 2。

表 2 补偿代码加工的刀片刀尖圆弧数据

序号	圆弧半径 (mm)	轮廓描述	序号	圆弧半径 (mm)	轮廓描述
1	0.180	中线接近理论位置;圆弧形状精度良好	6	0.201	中线接近理论位置;圆弧形状精度良好
2	0.185		7	0.205	
3	0.191		8	0.211	
4	0.192		9	0.216	
5	0.196		10	0.219	

通过对比理论代码与补偿代码加工的刀片刀尖圆弧磨削质量,可以发现补偿前的刀片偏斜严重。轮廓图形被竖直拉伸,形状误差很大。经过补偿,将刀尖圆弧的中心线向图形右侧偏移,修正轮廓形状的畸变,使形状精度、尺寸精度均达到指定要求,提高了可转位刀片的刃磨质量,取得了满意的补偿效果。

5 结语

(1) 分析了机床伺服系统的跟随误差对刀尖圆

弧形状精度的影响,推导出刀尖圆弧形状误差与伺服增益的平方呈反比关系,与进给速度的平方呈正比关系;分析了进给轴换向间隙的连续累加造成的刀尖圆弧轮廓误差变化趋势。

(2)提出了基于刀尖圆弧制作误差的指令代码再设计补偿模型,增加了圆弧半径补偿值 Δr 、回转角度补偿值 $\Delta\theta$ 、幅值修正系数 k 三个影响因子,校正刀尖圆弧的轮廓畸形、中线偏移、尺寸不符的缺陷。

(3)批量磨削了一种带有半径为0.2mm超小刀尖圆弧的菱形刀片,通过试验数据对比理论代码与补偿代码的磨削效果,验证了补偿方法的技术适用性,使得刀尖圆弧的加工精度得到大幅提升。

参考文献

- [1]何浴辉,陈永洁,陈仕魁. 硬质合金可转位刀片刀尖圆弧半径对切削过程的影响[J]. 硬质合金, 2003(1): 25-28.
- [2]田新城,徐青,常宏敏,等. 一种磨削加工尺寸误差的智能自学习补偿算法及仿真[J]. 山东工业大学学报, 2001(2): 160-164.
- [3]杨建国,范开国,杜正春. 数控机床误差实时补偿技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [4]宋寅,姚斌,沈志煌,等. 可转位刀片圆弧过渡刃曲面的成形理论[J]. 机械设计, 2013(6): 90-93.
- [5]孙建仁. 数控机床进给伺服系统影响加工精度的分析[J]. 兰州理工大学学报, 2004(3): 45-47.
- [6]徐创文,穆玺清. 进给伺服系统特性对加工精度的影响分析[J]. 航空精密制造技术, 2002(5): 43-46.
- [7]陈建雯,刘立新. 反向间隙对数控加工的影响与补偿[J]. 装备制造技术, 2008(9): 76-77, 87.
- [8]田新城,徐青,彭勃. 磨削加工误差智能补偿系统及输入输出响应[J]. 系统仿真学报, 2003(11): 1631-1633.
- [9]田新城,彭勃,徐青,等. 可转位刀片周边数控磨削加工自动编程技术[J]. 山东大学学报(工学版), 2002(5): 473-475.
- [10]Jiang Bin, Zheng Minli, Xu Fang, et al. Safety prediction of high speed face milling cutter with indexable inserts[J]. Key Engineering Materials, 2008, 375-376: 593-597.
- [11]Zou X Y, Sun J F, Chen W Y, et al. The effect of tool edge preparation of indexable carbide insert [J]. Key Engineering Materials, 2012, 499: 342-347.
- 第一作者: 罗琪, 硕士研究生, 厦门大学航空航天学院, 361005 福建省厦门市
First Author: Luo Qi, Postgraduate, School of Physical and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China
- 通信作者: 姚斌, 教授, 博士生导师, 厦门大学航空航天学院, 361005 福建省厦门市
Corresponding Author: Yao Bin, Professor, Doctoral Tutor, School of Physical and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

机器人产业发展仍面临严峻挑战

在机器人产业走向发展的路上,我国成为了全球机器人最大的消费国,市场潜力被不断激活,国内厂商争相布局。但是与国外相比,我国机器人产业仍然面临严峻的挑战。

据中国机器人产业联盟统计数据显示,2009-2014年我国工业机器人销量平均增速达到了58.9%,2014年国内市场销售的机器人达到5.7万台,继2013年之后已连续两年成为全球最大的机器人消费国。2014年全球工业机器人销量再创新高,达到了22.5万台。国内机器人产业正在升温,但国内厂商仍处在追赶世界先进水平的进程中。在新一轮技术革命的竞逐中,行业需要突破更多的核心技术,取得更多超越性的成果。

和国际先进的机器人技术相比,目前我国工业机器人产业还处于成长期,技术水平还存在一定差距。机器人产业的上游是核心零部件,在该领域高精度伺服电机、高性能控制器、精密减速器等核心技术现在还基本依赖进口。机器人产业的中游是机器人本体,机器人产业的下游是系统集成商,目前国内95%的企业集中在这一环节上。从市场占有率

看,虽然我国现在有大大小小的500余家机器人企业,但是这些机器人企业生产的产品在国内机器人市场只有20%的市场占有率。

我国即将成为全球最大的机器人需求国家,但相关专业的人才缺口仍然巨大。按照工信部的发展规划,到2020年,工业机器人装机量将达到100万台,大概需要20万工业机器人应用相关从业人员。这就意味着,从2015年开始到2020年,平均每年需要培养4万名左右的工业机器人应用人才。但目前,仅苏锡常地区使用工业机器人的企业就达3000家以上,工业机器人相关技术人才缺口超过2000人。分析认为,国内企业用工成本逐年攀升,用工业机器人替换人工,目前是整个制造业的大势所趋。

产业的发展还要靠集群规模。专业人士认为,靠小企业、小钱来发展机器人产业是不可能的,中国需要有规模的机器人企业,这个规模不仅仅指产业规模,更指企业的综合实力。经验证明,机器人2.0时代,要真正抓住技术革新的机遇,走到产业价值链条的顶端,获取最丰厚的市场回报,国内厂商要有弯道超车的想法,要有挑战高端的勇气,既要抓住核心技术,又要突出自身优势,充分尊重市场规律,实现差异化发展,从而走出一条属于中国机器人产业的突破创新之路。