

# 从企业单位时间资金利润率指标 看机床工业的发展趋势

陈志同,朱正清

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

**[摘要]** 对机床工业的发展趋势做准确预测是一件艰难的事情,因为有太多原因会影响机床工业的发展动向,但在商品社会中,个人和企业一般以追求经济利益最大化为基本原则。机床是用来加工零件的,利用某种机床加工某种零件所能获得的最高效益基本反映了机床的能力和优势。提出一种基于单位时间资金利润率为指标的机床评价方法,并依此对机床工业几个可能的发展方向进行初步预测,希望为新型机床的研究开发和机床性能的提升途径提供一种有效的分析思路。

**关键词:** 单位时间资金利润率; 机械加工; 柔性制造; 优化; 高档机床

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.11.026



陈志同

博士、教授、博士生导师,研究方向为航空发动机叶轮叶片磨削与抛光,复杂曲面测量造型与数控编程,切削、磨削和抛光工艺参数优化与数据库,精密传动技术。

很多学者都对未来机床的发展动向进行了很有价值的预测<sup>[1]</sup>,但是缺乏一个通用模型将它们联系起来,以获得合乎逻辑的结论。机床的改进和优化从数学上看也是一个优化问题,其中随着时间的不断优化和改进则可以认为是进化过程,它们原则上具有严格的数学模型。机床的技术指标是一台机床设计所需要满足的约束条件,机床的经济指标则一般是机床选择和设计的目标函数,选择和设计一台机床的过程的问题应该是在能够满足零件加工质量和加工精度要求下加工过程的经济性的改善问题。从优化模型分析机床工业的发展是一条合理途径。

虽然机械加工工艺过程非常复杂,但总可以细分成很多更小的单元,如工序、工步、走刀,它们构成一种树状数据结构。同时,一个工序也可以分解成若干次安装和若干个工位,每次安装和每个工位可能包含

若干个工步,它们也都可映射成树状数据结构。数控铣削加工过程中的一次走刀可能包含很长的一个过程,其中包括直线、拐角等多个子过程,在不同的子过程应该采用不同的切削参数。因此在数控加工中,可将一个连续的刀具轨迹(走刀)分解成很多不同的单元,每一个所有工艺参数都保持不变的、单位时间内完成的微小切削加工过程称为单元切削过程。因此可以认为,机械加工过程是由很多单元切削过程组合而成的。文献[2]研究并提出了单元切削过程评价的一种新方法,即单元切削过程的利润率模型,它将复杂的切削参数优化问题简化到一个更小的单元,使得切削参数优化模型具有良好的可用性。该模型认为,一组工艺参数的好坏是在能保证加工质量和加工精度的前提下所能获得的单位时间资金利润率的高低。该模型将机械加工工艺过程和银行系统的经营过程所获得

的利润和利润率等同起来。事实上, 社会上的所有生产过程都可以和银行系统的评价标准联系起来, 在不考虑银行倒闭的情况下, 银行的好坏是以其能为客户提供的单位时间资金利润率(年利率)来比较的, 因此, 生产过程工艺参数的选择也应该是以获得单位时间资金利润率最高来确定。这种方法也可以被扩展到工具的优选、机床的选择、工艺过程的选择乃至合作厂家的选择。例如, 航空工业昌河飞机工业有限公司将这种方法成功应用于刀具的优化选择过程, 并制定了专门的企业级刀具选择标准, 刀具的选择是以刀具在其为企业获得的利润率达到最大的状态作为其最优工作状态, 比较不同刀具的最优工作状态下的单位时间资金利润率可以获得特定加工对象下的最优刀具, 这给工具的优选提供了一种非常有效的方法。可以利用同样的方法来选择机床和确定机床改进方向, 即采用单位时间资金利润率对机床的技术经济性进行综合评价。

### 机械加工工艺条件的量化评价

机械加工过程需要对切削参数、刀具、机床、测量方法和工具、工艺流程等进行评价, 科学合理的评价是促进企业进步和确保企业获得更好经济效益的有效途径。工艺条件优化的一般模型是:

$$\max_{x \in D} \eta_{v,p,t} \quad (1)$$

其中约束条件具有形如  $D: \{n < 24000 \text{r/min}; v_f < 140 \text{m/min}; a < 30 \text{m/s}^2\}$  的形式, 具体的约束条件可能不止这些, 它们需要满足的技术条件, 包括加工精度、表面完整性、机床性能指标的范围等。

对于一个单元切削过程, 其粗、精加工过程单位时间、单位资金的利润率可分别表述为式(2)、式(3)和式(4)。其中粗加工的单位时间资金利润率:

$$\eta_{v,p,t} = \left[ n_s k_a w_v \dot{v} - \left( e_h + e_p + e_m + \frac{c_t}{T} \right) \right] (t_m / t_a) / P_c \quad (2)$$

$$(t_m / t_a) / P_c \quad (2)$$

考虑单个参数质量提升和合格率时的精加工单位时间资金利润率:

$$\eta_{s,p,t} = \left[ n_s k_a e^{k_t(6\sigma_0 - 6\sigma)} w_s \dot{s} - \left( e_h + e_p + e_m + \frac{c_t}{T} \right) \right] (t_m / t_a) / P_c \quad (3)$$

考虑多个参数质量提升和合格率时的精加工单位时间资金利润率:

$$\eta_{s,p,t} = \left[ n_s k_a \sum_{i=1}^{n_i} w_{a,i} e^{k_{t,i}(6\sigma_{0,i} - 6\sigma_i)} w_s \dot{s} - \left( e_h + e_p + e_m + \frac{c_t}{T} \right) \right] (t_m / t_a) / P_c \quad (4)$$

式中,  $\eta_{v,p,t}$ 、 $\eta_{s,p,t}$  分别为粗、精加工单位时间资金利润率,  $w_v$ 、 $w_s$  分别为粗精加工价值系数,  $6\sigma_0$  ( $\sigma_{0,i}$ )、 $6\sigma$  ( $\sigma_i$ ) 分别为工序公差和实际加工误差的主要分布范围之半(合格率 99.99966%),  $n_i$  为工序中的关键技术要求数量(包括尺寸形状位置公差和表面质量要求),  $w_{a,i}$  为关键技术要求的权重,  $n_s$  为同时加工的主轴数量,  $k_a$  为合格率,  $k_t$  为质量提升系数,  $e_h$ 、 $e_p$ 、 $e_m$ 、 $c_t$  分别为单位时间人工、能源、机床使用成本以及单把刀具的使用成本(刀具使用达到一个刀具耐用度  $T$  的成本),  $T$  为刀具在给定参数下的使用寿命或刀具耐用度,  $t_a$ 、 $t_m$  分别为总的工序加工时间和切削加工时间,  $P_c$  为所使用资源总价格, 主要包括设备的总价格及所使用工人的全工作期企业支付成本总额。

单位时间资金利润率越高, 证明某单元切削过程的技术水平和竞争力越高。根据统计学原理<sup>[2]</sup>, 同一个企业的平均单位时间利润率应该趋向一致并不断提高, 一个企业同时经营低利润率产品和高利润率产品并不合理, 企业的生产活动应该且可以被分级, 高利润率企业应该放弃一些低利润率的工作并让给低利润率生产者实施, 只有这样每个企业才能在自己能力范围内获得利益最大化, 因此, 单位时间资金利润率成为度量企业及其子系统、子过程的主要度量指标, 该指标指引着机床经济性改进的

方向, 而机床技术性改进则是约束条件中各技术指标的提升。

### 从不同经济性角度看待机床工业的发展趋势

公式(1)表明, 工艺条件的评价包括技术性和经济性两个部分, 前者构成约束条件, 后者构成目标函数, 目标函数就是评价技术经济过程的总指标, 根据其内部不同因素对目标函数的影响规律可以获得不断优化和进化的机床应该具有的性质, 由此可以获得机床发展的基本动向(优化和改进)。机床的价值是以其生产零件的价值来体现的, 采用一种机床加工每类产品获得的利润率高于另一种机床, 那么前者显然是更优秀的机床。

#### 1 从提高加工精度和加工质量看中国机床的发展——高精度化

从公式(3)、(4)可以看到,  $w_s$  是加工精度为  $\pm 6\sigma_0$  表面的单位面积价值系数, 提高合格率  $k_a$  和精度水平  $\pm 6\sigma$  可以显著提高单位时间资金利润率。零件几何要素的加工精度和价格之间存在非线性关系, 一般情况下被认为是指数或幂函数关系, 如  $e^{k_t(6\sigma_0 - 6\sigma)}$ 。当机床加工零件误差分散性很小时, 表明零件的加工精度很高, 其价格自然就很高。而且当加工对象精度很高时, 精度每提高一倍, 价格会上升很多倍。虽然此时采用的机床价格  $P_c$  会上升, 但是由于精度上升导致的零件价值上升速度必定高于机床价格上升速度, 总体利润率水平也就会上升, 否则就没有人去从事高档机床的研制工作了。瑞士 Studer 磨床的价格通常为国产磨床的 10~20 倍, 即使其利润率与普通机床持平, 这一台机床产生的利润也会与 10~20 台低档机床产生的利润相当, 对于一定规模的企业, 采用高精度机床将显著简化生产过程, 相当于将 10~20 台机床压缩成 1 台机床, 大量节省了管理成本, 因此, 发展高精

度机床是机床工业的一个重要方向,图1为目前两种国外高档精密机床。

提高机床精度可以提升产品的合格率,降低企业因产生废品导致的利润损失,因此在机床价格增长不多时提高机床精度是提高合格率的充分条件。很多人研究以车代磨工艺,这并不一定合理,因为随着机床加工精度的提高,车床成本的增加速度可能远高于磨床成本的增加速度,此时以车代磨就是错误的。从我国现阶段来看,我国在基本几何要素的车削、磨削、铣削等的工艺和设备与国外还存在很大的差距<sup>[3]</sup>,机床工业的首要任务就是缩小这一差距甚至有所超越。高档机床的一个重要指标是高精度,具体来看就是发展高精度磨床、镗床、车床、铣床、齿轮和螺纹加工机床等,使我国加工圆柱面、圆锥面、平面等能力快速提升,尽快提高如图2所示的基础传动元件和基本几何结构要素的制造技术水平。

## 2 从提高机床加工效率看机床的发展趋势——高速化

从式(2)、(3)可以看出,体积去除率 $\dot{v}$ 和面积形成率 $\dot{s}$ 与单位时间资金利润率中的正值部分成正比,显然,提高加工效率是非常有效的提高

经济性的途径。如铝合金加工采用高进给速度可以获得更高的效率,此时高速切削成为非常重要的方向。Blohm公司采用直线电机将机床进给速度提高到140m/min,其代表性机床如图3所示。

叶片叶轮的进排气边在加工时需要很大的加速度,否则加工效率就难以提高,因此需要发展高速度和高加速度机床。提高机床的速度需要发展先进的传动技术,提高机床的加速度更加有效的途径是采用新的机构。并联机构通常比串联机构可以获得更大的加速度,因此,北航在此基础上提出了利用差动螺旋机构来构造高加速度机床的方法<sup>[4]</sup>,如图4所示。

## 3 从同步加工的角度看机床的发展趋势——多主轴化

$n_s$ 是同一台机床上同时加工零件的个数。很多机床为了获得足够的精度和刚度必须采用加大的机床结构,有时是为了扩大机床的工艺范围而增加床身的尺寸,实际加工零件的尺寸往往只有机床尺寸的1%以下。研究表明,在精加工过程中,切削或磨削消耗的功率远小于机床做加速减速运动的功率<sup>[5]</sup>,因此如何充分

发挥机床的工作效率成为一个重要工作。采用多主轴同步加工是一种非常有效的方法。目前的多主轴同步加工通常将主轴排成一排形成线性排列,北航在此基础上提出了矩形阵列和圆周阵列机床结构,前者可以将同样尺度内的主轴数量从 $n^1$ 提高到 $n^2$ ( $n$ 为一系列上的主轴数),这种方法当 $n=10$ 时会相当于将100台机床压缩到1台机床的空间中,成为百轴机床。但是设计一种机床的成本超过主轴数量的增加速度时就是不合理的。磨削、抛光、钻孔、轻载铣削需要的功率很小,增加一个主轴的成本增加量很小,因此有利于利润率的提高。但是强力铣削时,机床的成本随着主轴数量的增加而产生快速乃至非线性增长,甚至高于主轴的增长速度,那么此时就不宜采用多主轴阵列加工方式。北航注意到了采用多主轴同时加工多个零件的方法可以降低机床功率在每个零件上的消耗,发展多主轴阵列化同步加工技术对于我国实现绿色高效制造有着非常重要的意义,因此北航率先研究设计了多种矩形阵列加工机床以提高加工效率和主轴功率利用率。其中包括图5所示的矩形阵列机床<sup>[6]</sup>和圆周阵列机床<sup>[7]</sup>。

## 4 从降低机床成本角度看机床的发展趋势——少伺服轴化

机床联动轴数的增加会显著提高机床的成本。北航研究发现环面铣刀或砂轮,如图6(a)所示,可以显著扩大机床的工艺范围,很多原来需要五轴机床加工的零件采用环



(a)肖柏林精密车床 (b)Studer磨床

图1 两种国外典型高档精密机床

Fig.1 Two kinds of typical high precision machine tools abroad



图2 基本和重要传动元件

Fig.2 Basic and important transmission elements



图3 Blohm Prokos磨床

Fig.3 Prokos grinding machine developed by Blohm

面工具后只需要三轴机床就可以了。或者将零件的安装姿态、刀具姿态进行适当调整也可以避免采用多轴联动机床。最为特殊的例子就是螺旋刀具加工,此时可以采用凸轮进行刀具螺旋槽等的磨削运动控制,机床自由度降低到1~2轴,价格可以低到1~2万元。根据该思路,北航提出了一系列利用三轴机床加工叶片和叶轮的方法,图6(b)为采用三轴联动加工叶轮的原理示意图,通过VERICUT仿真也验证了其可行性。

同时采用多种工装和工具角度头也是扩展机床工艺范围的有效方法。刀库中可以安装很多不同姿态的工具,利用它们可以显著降低对机床联动轴数的要求,显著降低机床成本。一般一台三轴机床的价格只有五轴机床的10%,可见研究少轴数机床的辅助工装和加工工艺不仅可以扩大简单机床的工艺范围,而且也能显著提高经济效益,图7所展示的为北航在减少机床轴数的思想上研发出的多角度动力头,结合刀库可以在三轴或四轴机床上实现大多数原本需要在五、六轴机床上完成的加工。

### 5 从提高自动换刀水平看机床的发展趋势——自动化

$t_m/t_a$ 是切削时间和总时间的商,它直接影响利润率水平。机床的切削加工时间和总时间存在一定差距,这些差距主要是工件安装时间、拆卸时间、换刀时间等,提高工件装拆过程的自动化程度和缩短换刀时间是提高利润率水平的重要途径。完全无人化的生产过程可以使 $e_h=0$ ,因此,当人工成本不断攀升时,实现无人化、自动化生产是一种重要的发展方向。实现自动化生产,应重点发展柔性制造单元。柔性制造单元在德国、英国、日本都得到非常成功的应用,例如罗罗公司叶片榫头柔性U形生产单元、马扎克公

司机床箱体柔性制造生产单元以及美国哈挺公司的多用途柔性制造单

元等。图8为罗罗公司的叶片柔性磨削单元。

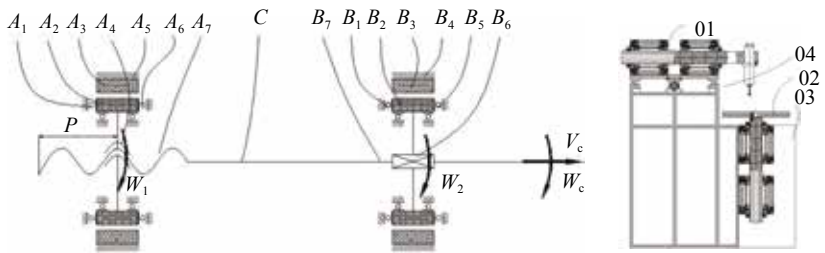
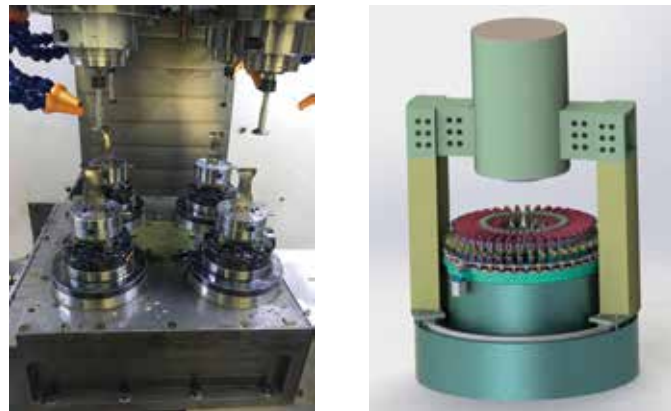


图4 北航提出的螺旋机床原理

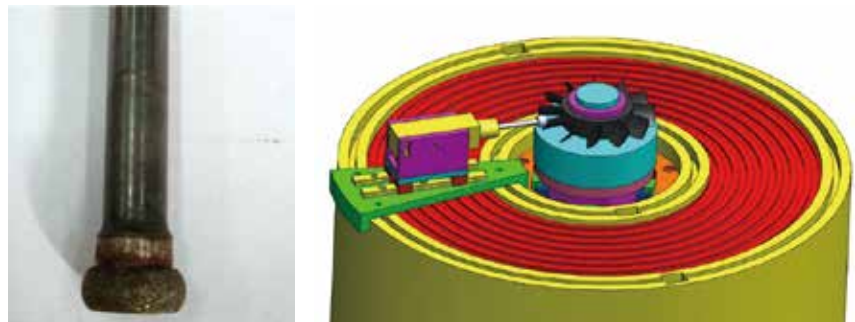
Fig.4 Principle of the spiral machine tool proposed by Beihang University



(a) 四主轴矩形阵列五轴联动机床 (b) 具有30支主轴的圆周阵列机床

图5 矩形阵列机床和圆周阵列机床

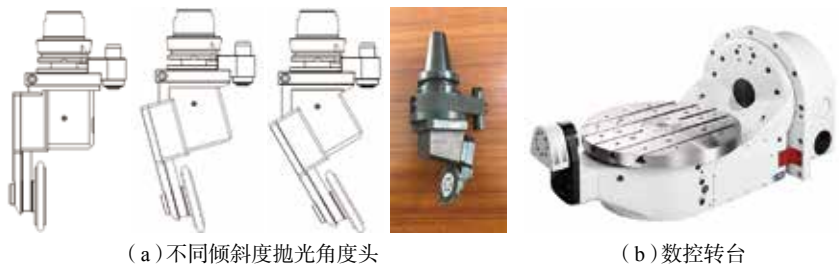
Fig.5 Rectangular array machine tool and circular array machine tool



(a) 环面刀具 (b) 叶盘三轴加工方法

图6 环面刀具和三轴联动叶盘加工方法

Fig.6 Blisk machining with torus cutter and 3-Dof machine tool



(a) 不同倾斜度抛光角度头

(b) 数控转台

图7 角度头装置和转台分度装置

Fig.7 Angle heads and indexing device

### 6 从降低能耗方面看机床的发展趋势——绿色化

据资料显示,我国单位 GDP 能耗约是美国的 7 倍、日本的 6 倍,高能耗是我国工业技术水平的一个负面表征。对于机床工业,传动元件的精度保持性差、机床整体工作寿命不足、机床结构复杂多变和可重用性差都构成了高能耗的原因。电信电缆、液压元件、接插件等的工作寿命不足导致机床工作可靠性降低。大量生产低档的、低附加值的简易机床虽然发挥了一定的积极作用,但是低端机床的大量生产拉低了我国机床工业的整体水平。机床不同元件设计寿命的不一致,机床应用过程的工艺参数不优化和低加工效率也是影响机床绿色化的重要原因。为了提高效率和产能,机床用户大量采购低端机床,但从整体上看,低端加工制造比重对于国家制造业的整体水平提升具有很大的负面作用。根据公式(2)、(3),制造业的技术水平提升需要降低机床的实际成本  $P_e$ , 采取高档机床国产化方法是降低  $P_e$ 。最为有效的途径。同时降低机床能耗  $e_p$ , 提高机床同步加工主轴数量  $n_s$  及其进给速度和加速度,优化工艺参数和提升体积去除率  $v$  和面积形成率  $s$  等途径是实现绿色生产和实现机床工业绿色化的重要途径。

### 7 从加工方法改变看机床的发展趋势——新原理机床

在航空航天和民用工业,机械零件的加工方式改进非常缓慢。目前



图8 罗罗公司叶片磨削单元  
Fig.8 A grinding cell of blades in Rolls-Royce company

还有很多问题制约着机械制造业的发展。其一就是内曲面的加工,小尺寸内曲面(如榫槽、小孔、内齿轮、精密内圆柱面等)的加工效率、加工精度都有待大幅度提高。在航空发动机行业,涡轮盘榫槽一直采用拉削方法加工,材料加工难度大、刀具磨损快、精度难以提升<sup>[8]</sup>;对于机器人工业、小型内齿轮的磨削是一个重大难题,砂轮直径小、精度保持性差、磨削效率低。文献[9]所提的是一种穿越磨削的方法,可望用于解决这类问题,将内齿轮等的磨削效率提高5~10倍以上,并替代目前的榫槽拉削方法,显著降低加工成本、提高加工精度,其原理如图9和图10所示。

另外,在航空航天工业中很多零件的毛坯体积远大于零件体积,通常85%以上的材料需要被去除。一些简单零件的加工已经能够把切削

加工提升为切割套料加工,大幅度提高加工效率,这种方法也可以扩展到曲面加工领域,因此切割套料加工方法有可能得到更大发展,如北航提出的柔性电极电解套料方法可望将整体叶盘的加工时间缩短到目前的1%以下,其装置结构如图11所示。

### 结论

本文提出一种以单位时间资金利润率为目标函数或指标的机床工业发展需求和动力的分析方法,主要结论是:

(1) 机床工业的基础应该是具有高技术指标的机床,发展基本几何要素的高精度、高速度、高加速度加工机床是提高利润率和竞争力的有效手段和提升国家制造技术水平的基本途径;

(2) 从组成单位时间利润率的各个要素看,适当发展多主轴阵列机

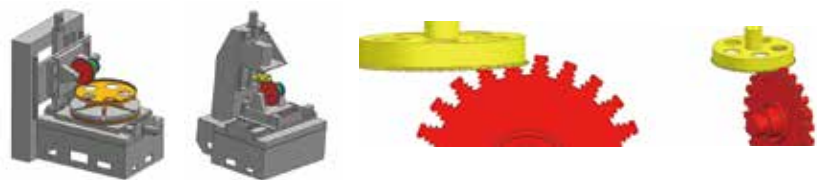


图9 穿越磨削加工涡轮盘榫槽

Fig.9 Grinding mortise of turbine disk with a tool passing through the groove

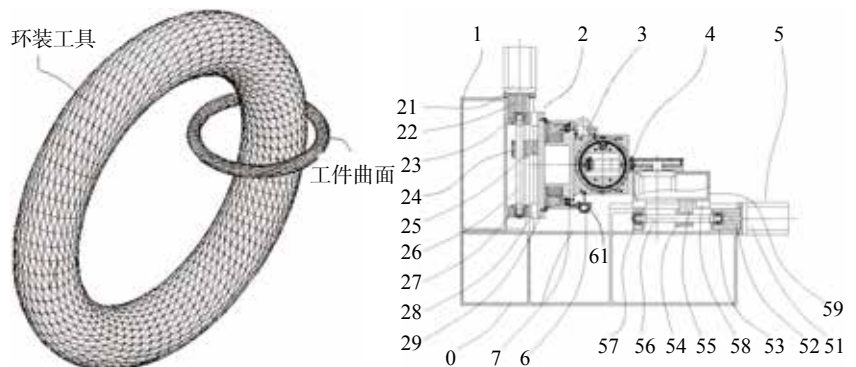


图10 穿越磨削原理图

Fig.10 Principle of passing through grinding method

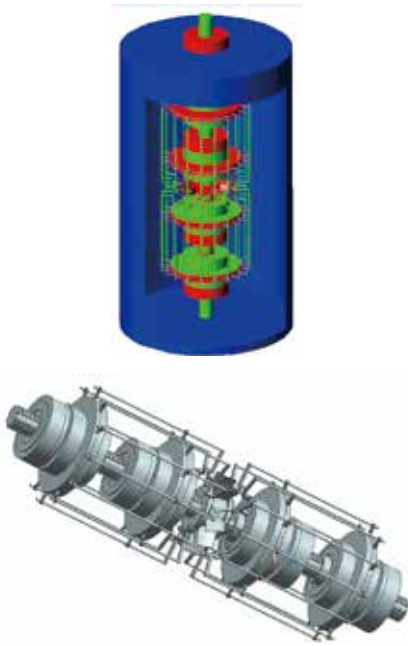


图11 柔性带状电极电解套料加工装置  
Fig.11 Electrolytic trepanning device with flexible strip type electrode

床、高速度和高加速度机床、低成本机床、少坐标机床、柔性加工单元等有利于提高加工过程的经济性；

(3) 加工方法的变化会产生重大的变革。需要发展全新的加工方法来替代传统的加工方法,例如内曲面的穿越磨削方法和分割切割等加工方法,极有可能实现加工效率和加工效益1个数量级的提升。

## 参考文献

[1] 金华. 国产数控机床及其关键技术发展现状及展望[J]. 科技资讯, 2017, 15(11): 123-125.

JIN Hua. Present situation and prospect of domestic CNC machine tools and key technology[J]. Science & Technology Information, 2017, 15(11): 123-125.

[2] 陈志同, 张保国. 面向单元切削过程的切削参数优化模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 230-236.

CHEN Zhitong, ZHANG Baoguo. Mathematic model on cutting parameter optimization for unit cutting process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 230-236.

[3] 董一巍, 李晓琳. 未来机床发展走向及热点技术浅谈[J]. 航空制造技术, 2015, 58(5): 32-37.

DONG Yiwei, LI Xiaolin. Development trends and key techniques of the future machine tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(5): 32-37.

[4] 陈志同. 一种差动螺旋机构及基于差动螺旋机构的多轴机床: CN201310737514.0[P]. 2013-12-26.

CHEN Zhitong. A differential spiral mechanism and multi-axis machine tools based on it: CN201310737514.0[P]. 2013-12-26.

[5] 晓霏, 晓立. 机床新技术及未来发展[J]. 航空制造技术, 2008, 51(17): 40-44.

XIAO Fei, XIAO Li. New technology and future improvement of machine tool[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(17): 40-44.

[6] 陈志同, 陈胜林. 一种矩形阵列同步摆动机构及基于该机构的多轴联动加工机床: CN201410004979.X[P]. 2014-01-06.

CHEN Zhitong, CHEN Shenlin. A kind of rectangular array synchronous rotating mechanism and a multi-axis machine tool based on it: CN201410004979.X[P]. 2014-01-06.

[7] 陈志同, 陈宇飞, 王传彬. 一种圆周阵列曲面结构五轴同步加工装置: CN201310731503.1[P]. 2013-12-26.

CHEN Zhitong, CHEN Yufei, WANG Chuanbin. A five axis synchronous machining device with circular array spindles for sculptured surface machining: CN201310731503.1[P]. 2013-12-26.

[8] 高翔. 航空发动机涡轮盘榫槽拉刀快速设计系统研究与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

GAO Xiang. Research and development on mortise broaches rapid design system of aero-engine turbine disk[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016.

[9] 陈志同. 一种利用环状可拆分工具加工工件内表面的方法和装置: CN201310540971.0[P]. 2013-11-05.

CHEN Zhitong. A method and device for inner surface machining with a separable circular cutting tool: CN201310540971.0[P]. 2013-11-05.

通讯作者: 陈志同, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn.

## Development Trend of Machine Tool Industry From the Profit Rate of Enterprise Per Unit Time

CHEN Zhitong, ZHU Zhengqing

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** It is difficult to make accurate prediction the development trend of machine tool industry, because there are too many reasons that will affect it. However, in the commodity society, individuals and enterprises generally pursue maximization of economic benefits as the basic principle. The highest benefit that machine tool was used to process will reflects the capability. The unit time capital profit rate used to evaluate the quality of process parameters has been proposed. In this paper, a machine tool evaluation method based on the capital profit rate per unit time is proposed, based on this, several possible development directions of machine tool prediction are proposed, in hopes of providing an effective ideas for future machine tool research and development to enhance the performance of ways.

**Keywords:** Profit per unit time; Machining; Flexible manufacturing; Optimization; High-grade machine tool

(责编 李丹)