

高速加工环境下的刀具动平衡技术的研究与应用

Application of Tool Dynamic Balance Technology Based on HSM

上海航天精密机械研究所 彭明峰 王 堃

随着型号任务难度的日益增大,航天制造业正经历着全面推行高速加工的变革。在高速机床大量引进的背景下,重视高速加工相关技术的应用也非常重要。主轴-刀具系统的不平衡是由多种原因引起的,高速切削时,主轴转速很高,不平衡量会引起非常大的惯性离心力。在国内,刀具动平衡技术的推广和应用水平还相对较低,在传统思想上还没有把动平衡作为实施高速加工的必备条件来看待。试验表明,未经动平衡的刀具,其不平衡量较大,尤其在转速较高时,所使用的刀具必须要经过动平衡测试或使用能自动平衡补偿的刀具。

随着我国航天制造业的飞速发展,对产品外形与精度的要求愈发苛刻,同时“优质、高效、节能、低耗和环保”的新观念也逐渐深入人心。传统的机床加工模式已经无法适应产业发展的需要,高速加工(HSM)正成为一种绿色、高效的加工模式得到广泛应用。高速加工的优点众多,但前提是必须有相应的技术支撑,否则轻则缩短刀具寿命,影响产品质量,重则发生极为恶劣的安全生产事故。研究表明,随着主轴转速的增加,主轴、刀具系统产生的惯性离心力将呈平方级数增长,而惯性离心力使刀具寿命降低,使主轴轴承受受到方向不断变化的径向力的作用而加速磨损刀具,还会引起机床振动,导致加工精度降低,甚至可能造成重大的

事故和伤害。由此,刀具动平衡技术成为支撑高速加工顺利进行的关键技术,同时也是推行高速加工的必要前提。

刀具动平衡技术的理论研究

1 刀具动平衡与动平衡失稳

刀具动平衡是一个动态指标,它描述了回转主轴、刀具系统动平衡优劣程度。工程上实际并不存在绝对的动平衡,所谓的动平衡更多的是指该刀具系统回转时的平衡程度。ISO 1940“刚性转子的动平衡质量要求”标准规定^[1],一个转子的不平衡量(或称残留不平衡量)用 U 表示(单位为 $g \cdot mm$), U 值可在平衡机上测得;某一转子允许的不平衡量(或称允许残留不平衡量)用刀具动平衡

技术的车间级应用 U_{per} 表示。从工程实施的角度考虑,转子允许的残留不平衡量与转子的质量有关,即:质量越大所允许的残留不平衡量也越大。单位质量残留不平衡量用 e 表示,即 $e=U/m$ ($(g \cdot mm)/kg$),因此有 $e_{per}=U_{per}/m$ 。 U 和 e 都是转子相对于给定回转轴所具有的准动态特性,可定量表示转子的不平衡程度。

事实上,一个转子动平衡的优劣还与其使用时的转速有关。当转子高速旋转时,其动平衡会变得较为微妙:一旦转速到达一个临界值时,只需一个极为微小的扰动力就会打破转子固有的平衡状态,使转子产生很大的变形甚至破坏,这便是动平衡失稳。动平衡失稳现象的根本原因是转子回转过程中产生的惯性离心力。

一般来说,相对于旋转刀柄而言,主轴以及接口的刚度要大得多,因此刀柄可以简化为悬臂梁模型,当刀柄以某一转速转动时,若在悬臂端点处作用一个外力,该刀柄将产生变形,转轴因变形处于动不平衡状态,由此产生的离心力将使轴进一步产生变形,最终导致转子动平衡失稳。

假设刀具在离旋转中心 r (mm) 处有等效的不平衡质量 m (g), 刀具不平衡质量与其偏心的乘积定义 ($m \cdot r$) 为刀具不平衡量 U (单位: $g \cdot mm$)。当刀具旋转速度为 n (r/min) 时,便产生惯性离心力 f_c [2]:

$$f_c = \frac{1}{9}mr(\pi n)^2 \times 10^{-8} \quad (1)$$

若刀具质量为 15kg,在实际使用过程中,即使仅出现 $5\mu m$ 的偏心距,但在转速为 20000r/min 的情况下,也会产生 330N 以上的惯性离心力。而当转速增加到 30000r/min 时,产生的惯性离心力将剧增到 750N(图 1)。

2 刀具动平衡失稳的主要原因

刀具动平衡失稳的主要因素见图 2。

2.1. 刀具不平衡

(1) 金相缺陷导致刀具材质不均,从而引发不平衡;

(2) 刀具制造尺寸精度偏差导致不平衡;

(3) 非对称式刀具、刀柄以及连接件导致不平衡;

(4) 刀具使用时产生偏移导致

不平衡;

(5) 非整体式刀具系统装配时的累积误差导致不平衡。

2.2 主轴不平衡

(1) 主轴装配过程中产生的不平衡;

(2) 精度差产生的不平衡;

(3) 非均匀磨损引起的不平衡。

2.3. 其他因素

(1) 刀具装夹误差导致的不平衡。

(2) 刀柄弹簧组件发生偏移导致的不平衡。

(3) 刀柄与主轴接合面上颗粒物污染导致不平衡。

(4) 冷却润滑油导致不平衡。

(5) 耦合不平衡。

目前几乎所有的高速切削机床主轴在出厂前都经过严格的动平衡检测校对,因此产生动平衡失稳的主要因素是刀具系统不平衡引起的。

例如,某个刀具系统(含刀柄)平衡等级 G79,表示该转子的 e 值与使用时 ω 值的乘积应小于或等于 79。为了确定高速旋转刀具统一的合理平衡质量等级 G ,由德国政府和机器制造商协会(VDMA)所属精密工具专业委员会牵头成立了工作组,并提出了“高速旋转刀具系统平衡要求”的指导性规范(FMK-Richtlinie) [3]。

该规范对刀具平衡质量等级的制定原则以及具体确定方法做了严格的描述(图 3),总结起来有 5 点:

(1) 刀具平衡质量等级的要求应充分考虑技术性和经济性。

(2) 以主轴轴承动态载荷的大小作为刀具平衡质量的评价尺度,并规定以 G16 作为统一的上限值。

(3) 确定刀具系统合理不平衡量的下限值为刀具系统安装在机床主轴上时存在的偏心量。

(4) 刀具的内冷却孔必须对称

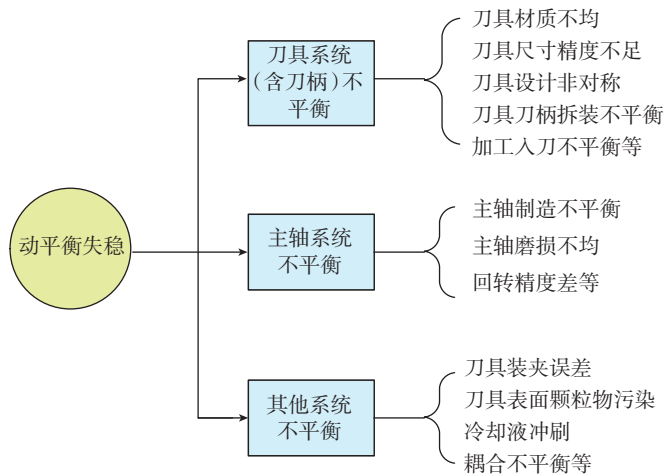


图2 主轴-刀具系统动平衡失稳的因素

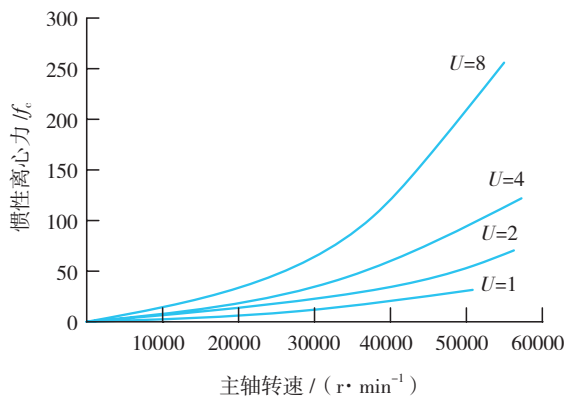


图1 主轴转速和惯性离心力的关系

3 刀具动平衡等级的评判

刀具动平衡是一个动态的概念,优劣程度该如何判定,这一点 ISO1940 标准有着非常明确的规定。动平衡质量等级 G (单位 mm/s) 是指 e_{per} 与角速度 ω 的乘积。

分布。

(5) 如果必要可将刀具刀柄系统和机床主轴作为一个整体进行平衡。

刀具动平衡技术的车间级应用

1 刀具动平衡技术的应用基础

刀具系统的动平衡失稳是高速加工的固有特性,会给加工带来严重的安全隐患和质量隐患,长期在动平

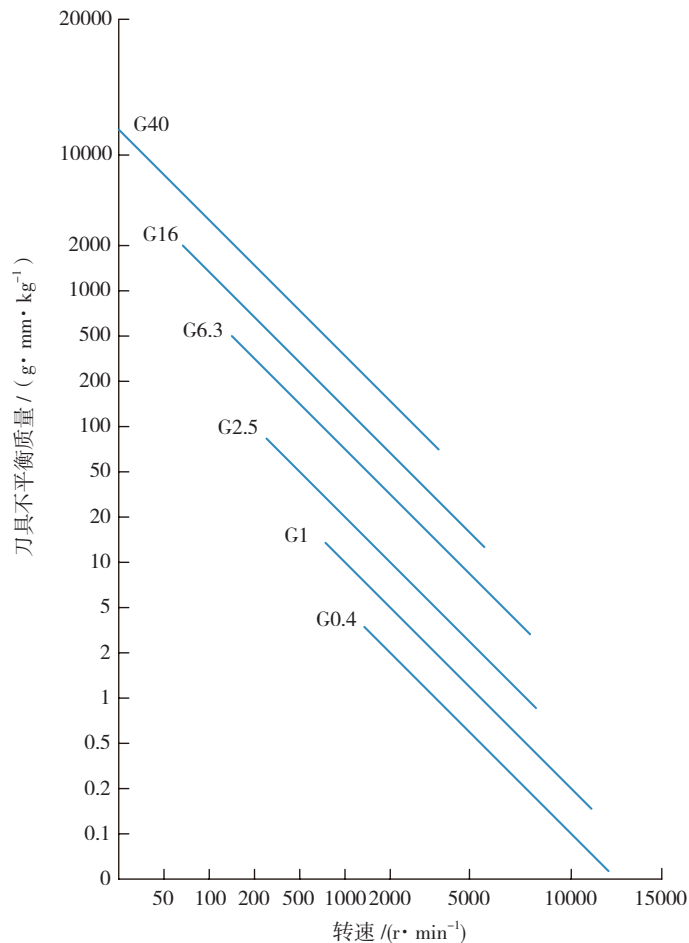


图3 单位重量允许的最大不平衡量

衡失稳的状态下进行高速加工会造成严重的后果。

(1) 机床主轴因频率性剧烈振动会使其寿命将大大降低;

(2) 过大惯性离心力将使得刀具系统加速磨损;

(3) 由于机床主轴的振动和刀具磨损,零件的尺寸精度和表面质量将无法保证,甚至报废;

(4) 当主轴-刀具系统无法承受巨大的惯性离心力时将发生严重的生产安全事故,在每分钟数万转的高速加工条件下其后果不可预计。

因此刀具动平衡技术在车间的应用不仅是保证零件质量的需要,同时也可以延长机床寿命、减少刀具磨损,更是保证生产安全的必要手段。

以某车间引进的龙门机床 GMC50100u 为例,该机床适用 HSK-

A63 刀具系统,根据 VDI2056 (DIN/ISO10816) “机械振动评定标准”的规定,可将使主轴轴承产生最大振动速度(1~2.8mm/s)的不平衡量作为刀具系统允许不平衡量的上限值。当以 1mm/s 或 2.8mm/s 的振动速度作为评价尺度时,在主轴轴承

振动速度固定时, HSK-A63 刀具系统在一定转速范围内所允许的平衡质量等级 G 的上限值与刀具的质量、转速有关,我们分别选取主轴振动速度为 1mm/s 和 2.8mm/s,转速范围 10000~40000r/min,针对重量为 1.5kg、2kg、5kg 的 3 种 HSK-A63 刀柄,计算出其对应的动平衡质量等级 G 上限值^[4](见表 1)。

由表 1 可见,1.5kg、2kg 和 5kg 3 种刀具系统在试验条件下允许的最大 G 值为 $240g \cdot mm$,而最小 G 值仅为 $5g \cdot mm$ 。换句话说,在实际加工中我们必须保证刀具系统的动平衡量小于表 1 中对应条件的 G 值,否则将会对高速加工产生不利的影响。

2 刀具动平衡技术的车间级应用

刀具动平衡技术的车间应用不同于试验环境应用,不仅要考虑刀具系统动平衡质量优劣问题,更重要的是能具有较强的操作性和便捷性,一般来说动平衡技术的车间级应用主要分为离线型和在线型 2 种。

2.1 刀具离线动平衡技术应用

离线型的刀具动平衡技术是使用专用的刀具动平衡仪来实现的,其流程如图 4 所示。

刀具动平衡仪将刀具低速运行时产生的不平衡量通过信号放大,从而实现诸如 10000r/m 以上转速的刀具系统 G 值测量。目前动平衡机大都配有数字显示式测量设备,并可通过人机对话操作在启动前设置刀

表1 HSK-A63刀具系统残留不平衡量允许值(部分)

刀柄规格	振动速度 极限 ($mm \cdot s^{-1}$)	刀具系统 质量/kg	转速/($r \cdot min^{-1}$)				
			10000	15000	20000	25000	30000
			允许残留不平衡量/($g \cdot mm$)				
HSK-A63	2.8	1.5	—	240	99	46.5	24
	2.8	2	—	240	96	46	24
	2.8	5	—	220	80	33	14
	1	1.5	—	86	35	17	9
	1	2	—	86	34	16	9
	1	5	—	79	29	12	5

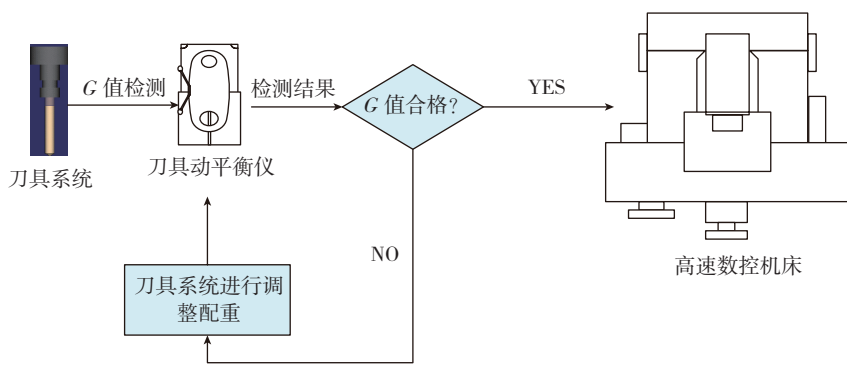


图4 单件离散型的刀具动平衡技术实施流程

具两校正面间的距离、校正面与支承点间的距离和校正面的半径，一次启动后就可将刀具的不平衡量和相位测量出来。

仍以 HSKA63 刀具系统为例，首先将刀具装夹在刀具动平衡仪上进行测量，测量结果为左滑动面上的不平衡量为 $345\text{g} \cdot \text{mm}$ ，相位 179° ；右滑动面上的不平衡量为 $178\text{g} \cdot \text{mm}$ ，相位 268° 。测量结果显示其不平衡量过大，需要进行调整。为此将相同的不平衡值设计在与原不平衡点成 180° 的位置上，工作时两反力相抵消，力平衡方程为：

$$m_1 r_1 \omega_2 = m_2 r_2 \omega_2, \quad (2)$$

式中： m 为不平衡质量； r 为偏心半径； ω 为角转速。

因角速度相等，因此，设计的修正不平衡质量与原不平衡质量相等，只要满足 mr 的乘积相等即可。经过在左滑动面和右滑动面上调整平衡环或配重螺钉后，再进行平衡测量，结果为：左滑动面上的不平衡量为 $9.5\text{g} \cdot \text{mm}$ ，相位 23° ；右滑动面上的不平衡量为 $8.7\text{g} \cdot \text{mm}$ ，相位 106° ，达到了小于 $10\text{g} \cdot \text{mm}$ 的动平衡要求，可以用于高速加工。如果经过配重调整后，发现刀具的不平衡量依然达不到允差要求，则需要重新进行调整，然后再次检测，如此循环往复直到不平衡量达到相应的要求为止（不平衡量的最低要求可参考表 1）。工程实际证明，仅用一次调整就满足动平衡

要求的情况较少，多数情况需要操作者进行反复测量调整方可达到要求。

2.2 刀具在线动平衡技术

机床操作人员在加工现场使用刀具时，由于对工具系统进行组合及对刀柄与主轴进行联接时均可能产生一定偏心量，从而使经过预先平衡的刀具产生新的不平衡，而离线型的刀具动平衡技术对刀具动平衡的测量实时性不强，其调整配重时间又因人而异，对于新上手的操作者来说，刀具的配重可能是一件非常费时费力的事情，效率不高。因此，开发一种能使整个刀具刀柄-主轴系统在驱动状态下实现平衡的在线平衡系统极具价值，利用该系统甚至有可能直接对未经预先平衡的刀具组件进行加工。

美国 Kennametal 公司开发的在线平衡系统由平衡刀柄、加速度传感器、控制器和调节器组成。其特点是将电磁驱动的配重盘配置在刀柄内，通过自动调节刀柄配重盘的相对位置，系统可对主轴和工具系统进行整体平衡，无需使用特殊主轴。

这种系统的先进性是不言而喻的，它省去了人工配重的繁复，配重时不必把刀具从机床上拆除，使刀具系统时刻处于动平衡监控状态，甚至使用未经预先平衡的刀具也可以自行调整至动平衡状态。但该系统仍存在弊端：

(1) 动平衡判断问题。

刀具系统在线运转时，机床内部及外部情况较为复杂多变，切削液的冲刷，飞屑的冲击及切削力作用，这些因素都会影响到动平衡的判定，如果不加以考虑那么刀具在线动平衡系统将频繁报警停机，反复进行动平衡调整，既不经济又影响效率。

(2) 刀具成本问题。

这种刀具在线动平衡系统是将动平衡检测、调整等模块统一集成在一把刀具上，构成一个完整的系统。但对于车间级应用来说并不现实。某车间加工中心数控机床 16 台，库存整体式刀具（含刀柄）数以千计，其中用于高速加工的刀具刀柄数量也非常庞大，如果都采用刀具在线动平衡系统那么成本将难以承受。

结束语

随着型号任务难度的日益增大，航天制造业正经历着全面推行高速加工的变革。在高速机床大量引进的背景下，重视高速加工相关技术的应用也非常重要。主轴-刀具系统的不平衡是由多种原因引起的，高速切削时，主轴转速很高，不平衡量会引起非常大的惯性离心力。在国内，刀具动平衡技术的推广和应用水平还相对较低，在传统思想上还没有把动平衡作为实施高速加工的必备条件来看待。试验表明，未经动平衡的刀具，其不平衡量较大，尤其在转速较高时，所使用的刀具必须要经过动平衡测试或使用能自动平衡补偿的刀具。

参考文献

- [1] ISO 1940/1. Mechanical vibration-balance quality requirements of rigid rotors-Part 1.
- [2] 刘战强. 高速切削刀具的动平衡. 新技术与新工艺, 2001(11): 19-20.
- [3] FKM-Richtlinie. Auswuchtanforderungen an schnelldrehende Werkzeugsysteme. VDMA-Verlag, 1999.
- [4] 赵炳桢. 刀具动平衡技术的发展现状. 工具技术, 2002, 6(12): 3-7.

(责编 三丰)