

(4) 含砂气固两相流湍流流动中确实存在着颗粒相的扩散现象, 证实了湍流横向脉动是颗粒扩散的主要原因, 且颗粒相横向脉动速度沿轴向逐渐增大, 为气固两相流理论的发展提供了补充。

参 考 文 献

- 1 GJB 150.12-86. 军用设备环境试验方法——砂尘试验. 中国航空工业总公司第 301 所, 2000 (GJB 150.12-86. Environmental Test of Military Equipment Sand and Dust Test. The 301 Institute of China Aviation Industries, 2000 (in Chinese))
- 2 Westerweel J, Dabiri D, Gharib M. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings. *Experiments in Fluids*, 1997, 23: 20~28
- 3 Keane RD, Adrian RJ. Theory of cross-correlation analysis of PIV image. *J Appl Sci Res*, 1992, 49: 191~215
- 4 Jakobsen ML, Hossack WJ, Created CA. Particle image velocimetry analysis using an optically addressed spatial light modulator: effects of nonlinear transfer function. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1757~1768
- 5 Wang GX. Directionally-unambiguous, digital particle image velocimetry studies using a image intensifier camera. *Experiments in Fluids*, 1995, 18: 358~362
- 6 吴飞雪, 董守平, 时铭显. 激光粒子成像技术测定旋风分离器内颗粒浓度场的实验研究. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(6): 72~76(Wu Feixue, Dong Shouping, Shi Mingxian. Experimental study on particle concentration distribution in a cyclone by particle image technology. *Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Sciences)*, 2000, 24(6): 72~76(in Chinese))

- 7 Kadambi JR, Martin WT, Amirthaganesh S, et al. Particle sizing using particle imaging velocimetry for two-phase flows. *Powder Technology*, 1998, 100: 251~259

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PARTICLE VELOCITY AND CONCENTRATION IN SAND AND DUST TEST

MA Zhihong LI Yunze ZHANG Hua WANG Jun
(School of Aeronautics Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract The sand particle velocity and concentration of solid-gas two phase flow are studied in the environmental test equipment with gravity applied on top. Using the wind tunnel of CAREERI of CAS and applying laser digital particle imaging technology, the particle velocity and space distribution in different sections of the sand orifice along the wind horizontal direction is determined.

In this paper, it is shown that the particle velocity can approach the wind velocity and the particle can just diffuse to the whole space only in the section that is about three meters horizontally from the sand orifice. It provides a basis to develop the large-scale sand and dust experimental test equipment.

Key words sand and dust, environmental experiment, DPIV, velocity vectors, concentration

切削加工中刀具颤振的迟滞反馈控制

何国毅

(南昌航空工业学院成教学院, 南昌 330034)

何国威

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 从金属切削加工的实际情况出发, 分析了刀具在切削加工中产生颤振的原因. 从力学的角度解释了刀具径向非线性颤振的机理, 说明这是一种自激振荡, 可以通过施加线性迟滞反馈力加以控制. 这种反馈力是位移信号的迟滞函数, 可以用于抑制振幅, 增加刀具的平稳性. 数值仿真验证了理论结果.

关键词 刀具, 颤振, 自激振荡, 反馈控制

在金属切削加工中, 机床、刀具和被加工工件的非线性耦合, 使得刀具有可能发生颤振, 在工件的表面产生振动波纹. 这种颤振不仅影响工件的精度和光洁度, 而且还会损坏

刀具. 因此刀具颤振的机理和控制引起了普遍的关注.

哈尔克维奇^[1]在 20 世纪 50 年代就指出, 刀具的刀尖沿工件切向的颤振是一种自激振动. 他还进一步猜测: 刀尖沿工件的径向运动也可能是一种自激现象, 但这个结论没有受到重视和深入研究. 直到现在, 仍然把刀具的径向颤振看成施加了非线性切削力的线性系统^[2], 而不是把它看成自激系统. 因此, 抑制振幅的方法就是施加非线性的反馈力^[3,4].

如果刀具的径向颤振是一种自激现象, 施加线性的反馈力就能抑制振幅. 这种反馈力是位移信号的线性迟滞函数, 工程上易于实现, 它为计算机控制刀具的平稳提供了一种简便方法.

2004-03-05 收到第 1 稿, 2004-07-27 收到修改稿.

1 刀具颤振的数学模型

当刀具沿工件径向发生振动时, 刀具的尖端会使工件表面出现波纹, 即振动波纹. 其原因是刀具的切削平面倾斜了, 从而改变了工作前角. 换言之, 刀具的径向振动总是伴随着工作前角的变化. 由于工作前角与径向速度成比例, 而切削力的径向分力取决于工作前角大小的变化, 因此, 切削力的径向分力是颤振速度的函数. 关于低碳钢的实验表明: 当工件的韧性较大时, 切屑沿车刀的摩擦力对于其滑行速度的依赖关系有降落区, 即径向分力对颤振速度的依赖呈降落特性, 由此导致车刀和工件之间的能量的交换和耗散, 这正是自激振动的机制.

在实际加工时, 刀具的切向颤振导致切屑的不均匀, 而刀具的径向颤振导致切屑的毛边. 这时, 径向分力是速度的函数且对称降落. 因此, 径向分力关于速度的泰勒展式的前 3 项为

$$f(u, u') = \varepsilon(u' - u'^3/3)$$

其中 u 是径向位移, u' 是相应的速度, ε 是小参数, 那么刀具的颤振方程是

$$u'' + \omega_0^2 u = \varepsilon(u' - u'^3/3) \quad (1)$$

这里 ω_0 是固有频率. 上式为典型的范德坡方程. 容易看出, 只要工件对刀具存在初始扰动, 如毛刺的扰动引起的刀具不平稳, 刀具就会发生自激振动, 其振动的极限环大小与初始扰动无关. 为抑制振幅, 建议对刀具施加迟滞的线性反馈力. 这种线性反馈力可以通过进刀的速度实现. 为简单起见, 直接把它模拟为

$$Q = \varepsilon A u(t - \pi/2\omega_0)$$

这里 A 是反馈力的幅值. 至此, 就得到线性迟滞力作用下的范德坡方程

$$u'' + \omega_0^2 u = \varepsilon(u' - \frac{1}{3}u'^3) - \varepsilon A u(t - \pi/2\omega_0) \quad (2)$$

它模拟了反馈作用下刀具的非线性颤振过程.

2 理论分析

我们采用平均法^[5]求解式(2)

当 $\varepsilon = 0$ 时, 式(2)的解就是

$$u = \alpha \cos(\omega_0 t + \beta) = \alpha \cos \phi \quad (3)$$

当 $\varepsilon \neq 0$ 时, 假定式(2)仍有式(3)形式的解, 只是 α, β 随 t 变化, 并且式(2)的颤振速度也保持形式

$$u' = -\omega_0 \alpha \sin \phi \quad (4)$$

把式(3)对 t 求导, 得

$$u' = -\omega_0 \alpha \sin \phi + \alpha' \cos \phi - \alpha \beta' \sin \phi \quad (5)$$

比较式(4)和式(5)就有

$$\alpha' \cos \phi - \alpha \beta' \sin \phi = 0 \quad (6)$$

再对式(4)求导, 得

$$u'' = -\omega_0^2 \alpha \cos \phi - \omega_0 \alpha' \sin \phi - \omega_0 \alpha \beta' \cos \phi \quad (7)$$

把式(3), (5)和式(7)代入式(2)

$$\begin{aligned} &\omega_0 \alpha' \sin \phi + \omega_0 \alpha \beta' \cos \phi = \\ &-\varepsilon(u' - \frac{1}{3}u'^3) + \varepsilon A u(t - \pi/2\omega_0) \end{aligned} \quad (8)$$

联立式(6)和式(8)解出

$$\begin{aligned} \alpha' &= -\varepsilon/2\pi\omega_0 \int_0^{2\pi} \sin \phi [u' - u'^3/3 - \\ &A u(t - \pi/2\omega_0)] d\phi \\ \beta' &= -\varepsilon/2\pi\omega_0 \int_0^{2\pi} \cos \phi [u' - u'^3/3 - \\ &A u(t - \pi/2\omega_0)] d\phi \end{aligned}$$

按平均法, 把 α', β' 看成在一个周期内不变, 就可以对上述两式积分得到

$$\alpha' = \varepsilon \alpha (1 - A - 3\omega_0^2 \alpha^2/4)/2 \quad (9)$$

$$\beta' = 0 \quad (10)$$

直接积分式(8), 就有

$$\alpha^2 = (1 - A) / [\omega_0^2/3 + \exp(-\varepsilon(1 - A)t)] \quad (11)$$

那么, 只要 $(1 - A) > 0$, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时, 就得

$$\alpha^2 = 4(1 - A)/3\omega_0$$

如果没有反馈力的作用: $A = 0$, 则颤振的幅值为 $\alpha_0 = 2/\sqrt{3}\omega_0$. 这说明刀具的颤振幅值与初始扰动无关. 它完全取决于结构参数, 是一种典型的自激振动, 而不是线性系统对外激的响应.

如果依靠计算机控制系统施加了迟滞的反馈力: $A \neq 0$ 且 $(1 - A) > 0$, 则颤振的幅值为 $\alpha = \alpha_0 \sqrt{1 - A}$. 显然, $\alpha < \alpha_0$, 这说明适当地施加迟滞反馈力, 即便是线性的, 也能抑制颤振的幅值, 增加刀具的平稳性.

3 数值仿真

利用差分方法对方程(2)进行了数值求解, 这时, 一阶和二阶导数均采用中心差分, 时间步长 $\Delta t = 0.05$. 在去掉前 2000 步暂态后, 下面给出了从 $t = 100$ 开始的运动状态, 包括位移 u 的时间历程, 位移 $u(t)$ 和位移的迟滞 $u(t + \Delta t)$ 构成的相图. 在整个讨论过程中, 小参数 $\varepsilon = 0.1$.

图 1, 图 2 给出了无迟滞反馈信号时位移的时间历程和相图, 这时, $A = 0, \omega_0 = 16\pi$, 初值 $u(0) = 0.1, u'(0) = 0.15$. 这两幅图表示出位移信号的周期特性. 因此刀具呈自激振荡.

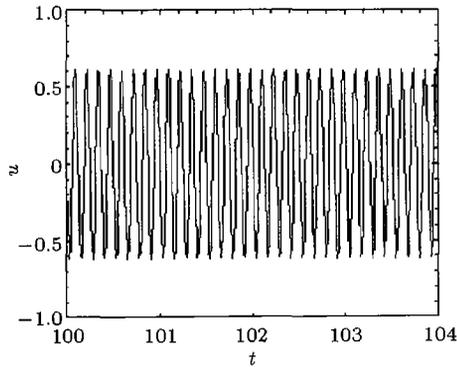


图 1 $A = 0$ 时位移的时间历程

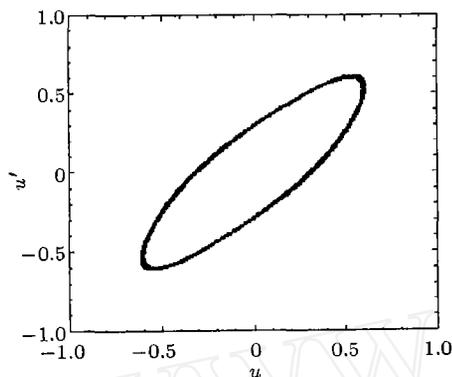


图 2 $A = 0$ 时的相图

图 3, 图 4 给出了无迟滞线性反馈信号 ($A = 0$) 和施加迟滞反馈信号 ($A = -1$) 时位移的时间历程和相图. 其中实

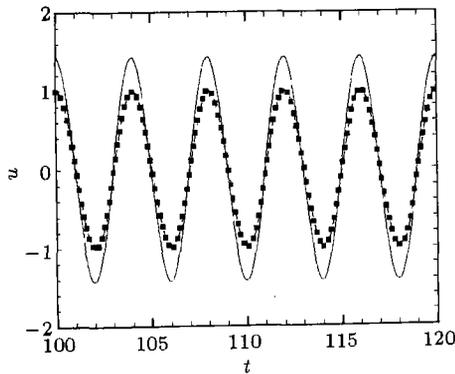


图 3 $A = -1$ 时位移的时间历程

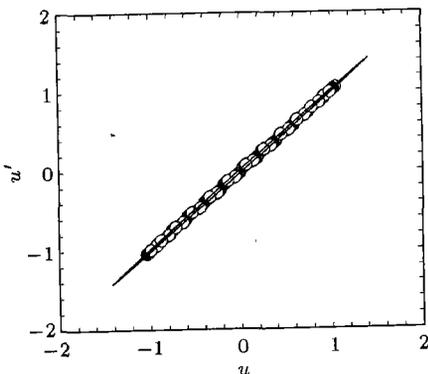


图 4 $A = -1$ 时的相图

线表示无迟滞线性反馈信号的情况, 方点和圆圈表示施加迟滞线性反馈信号的情况. 这时, $\omega_0 = \pi/2, u(0) = 0.1, u'(0) = 0.15$. 从图 3 中看出方块点的振荡范围要比实线的振荡范围小; 从图 4 中看出, 圆圈的振荡范围要比实线的振荡范围小. 因此, 施加迟滞线性反馈信号的刀具位移要比不施加迟滞线性反馈信号的刀具位移范围要小. 这种线性迟滞可以有效地减小刀具的振荡.

4 结论

本文建立了在计算机控制的迟滞反馈力作用下刀具径向颤振的非线性模型: 带迟滞反馈力的范德坡方程. 由此说明了刀具径向颤振的原因是自激振动. 如果适当地施加反馈力, 即使该力是线性的, 也可能抑制振幅, 增加刀具的平稳性.

参 考 文 献

- 1 哈尔克维奇 AA. 自振. 司秀, 刘羽译. 北京: 科学出版社, 1965 (Harkovich AA. Self-excited Vibration. Si Xiu, Liu Yu trans. Beijing: Science Press, 1965 (in Chinese))
- 2 Shi HM, Tobias SA. Theory of finite amplitude machine tool instability. *Int Journal of Machine Tool Design Research*, 1984, 24 (1): 45~69
- 3 Boothroyd G. Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools. NY, USA: McGraw-Hill, 1975
- 4 张伟, 杨绍普, 徐鉴等. 非线性系统的周期振动和分叉. 北京: 科学出版社, 2001 (Zhang Wei, Yang Shaopu, Xu Jian, et al. Periodic Vibration and Its Bifurcation in Nonlinear Systems. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese))
- 5 Nayfeh AH, Mook DT. Non-linear Oscillation. New York: Wiley Interscience, 1979

FEEDBACK CONTROL OF CUTTING-TOOL FLUTTERS IN MECHANICAL PROCESSES

HE Guoyi

(Institute for Adult Education, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034, China)

HE Guowei

(Laboratory for Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100080, China)

Abstract The flutters of cutting-tools in mechanical processes are investigated in this paper. The flutters are typically self-excited oscillations and could be described by the well-known van der Pol equations. The analytical solutions of the van der Pol equations obtained by the averaging method show the mechanism of the self-oscillations. A new strategy of linear feedback is developed to control the flutters. The control strategy could be realized by a delayed linear function. The analytical solutions of the van der Pol equations with delayed linear feedback show

that the flutters could be effectively reduced. Numerical simulations confirm the theoretical predictions.

Key words cutting-tools, flutters, self-oscillation, feedback control

用平均速度剖面法测量壁湍流摩擦阻力¹⁾

樊星 姜楠

(天津大学力学系, 天津 300072)

摘要 用 IFA300 恒温热线风速仪精细测量风洞中不同雷诺数流动条件下的平板湍流边界层近壁区域对数律平均速度剖面。利用平板湍流边界层近壁区域的对数律平均速度剖面与壁面摩擦速度、流体黏性系数等内尺度物理量的关系和壁面摩擦速度与壁面摩擦切应力的关系, 在准确测量平板湍流边界层近壁区域对数律平均速度剖面的基础上, 测量平板湍流边界层的壁面摩擦阻力。实现了平板湍流边界层壁面摩擦阻力的无干扰或微小干扰测量。该方法操作简便, 不需要在流场中安装测力天平、传感器等复杂的测量装置, 不需要对湍流边界层的壁面进行破坏, 不会影响湍流边界层壁面附近区域原有的流场条件, 是一种切实可行的测量平板湍流边界层壁面摩擦阻力的简便方法。

关键词 湍流边界层, 对数律, 平均速度剖面, 摩擦速度, 壁面摩擦阻力

1 引言

湍流边界层是自然界和工程技术中典型的湍流流动形态之一, 工程技术中大量的湍流问题与湍流边界层密切相关。相对于层流边界层, 湍流边界层可以使壁面摩擦阻力大幅度增加, 壁面磨损严重, 能耗加剧, 机械效率下降。因此, 从机理上分析湍流边界层中的流动结构及其形成原因, 进而提出控制湍流边界层的有效方法成为湍流研究的前沿课题, 而控制湍流边界层的主要目的之一就是减小壁面摩擦阻力, 从而降低能源消耗, 提高输运效率, 延长流体机械使用寿命。而检验一种控制湍流边界层的方法是否有效最重要的标准, 就是测量壁面摩擦阻力。目前, 工程中常用的测量壁面摩擦阻力的方法主要有天平直接测力法、斯坦顿 (Stanton) 管、普列斯顿 (Preston) 管、底层隔板法等^[1~5], 这些方法的一个共同缺陷是操作复杂, 都需要对湍流边界层的壁面进行不同程度的破坏, 如安装天平测力装置、镶嵌传感器、开孔、插管等, 这些或多或少地改变了湍流边界层壁面附近原有的流场条件, 从而影响测量的真实性、可靠性和准确性。

平板湍流边界层近壁区域的流向平均速度剖面的测量是一项比较成熟的技术, 经过近 100 年的研究和探索, 其近壁区域的对数律平均速度剖面已经得到广泛的公认。特别是近 30 年来, 热线测速技术 (HWA)^[6,7] 的广泛使用和激光测速技术 (LDA) 的成熟与发展^[8], 实现了对湍流边界层近壁区

域流场无干扰或微小干扰的平均速度剖面测量, 极大地提高了湍流边界层近壁区域对数律平均速度剖面测量的真实性、准确性和可靠性。

2 测量原理

湍流边界层近壁区域的对数律平均速度剖面与壁面摩擦速度 u_* 、流体黏性系数 ν 等内尺度物理量的关系为

$$\frac{U}{u_*} = A \ln \frac{yu_*}{\nu} + B \quad (1)$$

其中, U 为湍流边界层流向平均流速, y 为测量点的壁面法向坐标, A, B 为已知常数。壁面摩擦速度与壁面摩擦切应力 τ_w 的关系为

$$\tau_w = \rho u_*^2 \quad (2)$$

在准确测量湍流边界层近壁区域对数律平均速度剖面的基础上, 通过非线性迭代拟合其中的参数 u_* , 利用关系式 (2) 可以准确测量湍流边界层的壁面摩擦阻力 τ_w 。

3 实验设备和技术

为了检验本方法测量湍流边界层壁面摩擦阻力的有效性, 在风洞中用 IFA300 恒温热线风速仪和单丝微型热线探针精细测量了平板湍流边界层近壁区域的平均速度剖面, 通过非线性迭代拟合其中的壁面摩擦速度 u_* , 利用关系式 (2) 测量湍流边界层的壁面摩擦阻力 τ_w 。

DQS-1 型空气动力学多功能实验台可广泛应用于流体力学的实验教学和研究。该实验台由风机、稳压箱、收缩段、实验段等主要部分组成。风机吸收室内空气, 沿风道经调节阀和粗孔阻尼网进入稳压箱, 再经细阻尼网到收缩段, 而后进入实验段。实验段长 1100 mm, 横截面尺寸为 120 mm × 50 mm, 来流流速 25 m/s 时, 背景湍流度小于 2%。实验平板沿实验段的轴线安装, 平板长 $L = 400$ mm, 宽 50 mm, 厚 5 mm, 前缘为对称楔型, 在距离平板前缘 2.5 mm 处放置直径 1 mm 的丝线。

实验中用螺旋测微计移动热线探针, 其最小刻度为 0.01 mm。为了消除螺旋测微计的行程误差, 测速的过程是由里向外 (逐渐远离平板) 连续进行的。在速度测量结束后, 用最小刻度为 0.01 mm 的工具显微镜测量热线与平板间的

2004-06-14 收到第 1 稿, 2004-11-08 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目 (10472081, 10232020) 资助。