

DOI: 10.7652/xjtuxb201704001

注排液式砂轮在线动平衡技术研究

张西宁, 刘旭, 吴婷婷

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为有效抑制磨削过程中由砂轮失衡引起的振动,提出了一种新的注排液式砂轮在线动平衡方法,并设计了平衡装置。通过控制注入平衡腔内的液体与计算排出平衡腔的液体,控制平衡腔内残余液体质量,进而利用残余液体提供合适的平衡校正量。分析平衡腔内液体的离心力与腔内液位半径的关系,建立动态注液模型。采用打靶法对排液用的短孔型节流阀进行参数标定,分析了影响节流阀参数的因素,建立了流量控制模型,实现了平衡腔中残余液体量的精确计算。动平衡实验结果表明,在砂轮转速为 2 700 r/min 时进行校正,使用注排液式砂轮动平衡方法,振动幅值下降达 89.25%,验证了提出的在线动平衡方法的可行性和平衡效果,同时也表明该平衡方法具有持续的平衡能力,解决了现有注液式在线动平衡腔满而丧失平衡能力的问题。

关键词: 砂轮;在线动平衡;注排液式;转子振动

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0001-05

Liquid Injection and Drainage Online Dynamic Balancing Technique for Grinding Wheel

ZHANG Xining, LIU Xu, WU Tingting

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new liquid injection and drainage online dynamic balancing method is proposed for reducing the unbalance vibration of the grinding wheel. A new balance device is also designed. The liquid in the balance chamber is controlled by evaluating the injection liquid and calculating the drainage to provide appropriate correction mass. A dynamic liquid injection model is proposed by analyzing the relationship between the centrifugal force and the radius of liquid level in the chamber. The parametric measurement of the short hole throttle valve in drainage is accomplished. A theoretical model for flow controlling is established to calculate the liquid in the balance chamber by analyzing the influence factor of the throttle valve. Balancing experiment shows that the unbalance response is reduced by 89.25% at 2 700 r/min, the effectiveness of the proposed method is also verified. The new balance method with continuous balance ability solves the problem that liquid injection in online dynamic balance chamber loses the balance ability due to full cavity.

Keywords: grinding wheel; online dynamic balance; liquid injection and drainage; rotor vibration

近年来,对陶瓷、光学玻璃、单晶硅等脆硬材料
的加工需求,极大地推动了磨削技术的研究与推广。

砂轮作为磨床的关键部件,直接影响着机床的机械
加工工艺性能和效率。由于制造及装配误差使砂轮

产生不平衡量,工作过程中由于磨损和磨削液的附着又会产生新的不平衡量^[1],因此研究砂轮快速在线动平衡技术意义重大。

磨床上常用的在线动平衡装置主要有液体式、气体式及机械式 3 种^[2]。液体式平衡装置因具有附加质量小、平衡控制精度高的优势,在磨床上得到很好的应用。根据改变储液腔液体质量分布方式的不同,液体式平衡装置可分为注液式、液体转移式与注排液式等类型。注液式平衡装置最早出现在德国 Hofmann 公司的专利中,文献[3]已将此类装置做成产品,并在磨床上得到成功应用。文献[4]研制的注液式平衡装置在高速主轴动平衡实验台上,使主轴在 20 700 r/min 下的不平衡振动幅值下降约 78.8%,但注液式平衡装置没有排液能力,平衡能力会随着平衡腔内液体充满而丧失。文献[5]发明的气压液体式平衡装置,通过压缩空气驱动平衡液在各平衡腔内相互转移,来改变液体的质量分布,但此种装置结构复杂、可靠性低。针对注液式平衡装置没有持续平衡能力的缺陷,人们试图给注液式平衡装置增加排液功能。文献[6]研究了具有释液功能的自动平衡装置,原理是在平衡头上安装多个电磁阀,通过控制各电磁阀的开关来实现可控释液功能。该结构虽能实现对平衡液的可控排出,但在平衡头上安装电磁阀需附加电刷机构,并且需将多路控制电流引到旋转的平衡头上,使平衡头结构变得复杂,且会降低平衡装置许用转速及寿命。

本文提出了一种新的注排液式砂轮在线动平衡方法,采用节流阀实现排液功能,通过测定节流阀参数,实现排出液体的精确计算。平衡头整体结构简单,无需引入电流。动平衡实验结果验证了本文提出的注排液式在线动平衡方法的平衡效果。

1 注排液式动平衡原理

动平衡方法是通过改变质量的方式来平衡在一定转速下的转子所产生的不平衡离心力。为了解决注液式平衡方法的缺陷,注排液式在线动平衡采用了可控注液和自由排液的结构,由于注液流量远大于排液流量,所以储液腔中会形成残余液体。注排液式平衡装置正是利用储液腔体内的残余液体在转动过程中所产生的离心力的合力来平衡转子失衡量产生的离心力。注排液式砂轮在线动平衡系统组成如图 1 所示,工控机通过数采箱与传感器采集振动数据,然后对振动数据处理发出注液指令,通过开关量卡控制电磁阀经注液管向水槽内注液,水槽的圆

周方向上有排液孔,排液孔处安装短孔型节流阀,可以自由排液。

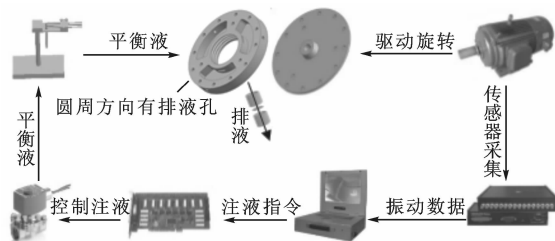


图 1 注排液式砂轮在线动平衡系统图

注液管结构如图 2 所示,3 路平衡液从注液管流出,沿箭头所示液流方向分别进入到如图 3 所示水槽的 3 个环形槽内。3 个环形槽分别与 3 个储液腔相对应,并通过通孔相连,环形槽内的平衡液在离心力的作用下经相应的通孔流入到 3 个储液腔内。

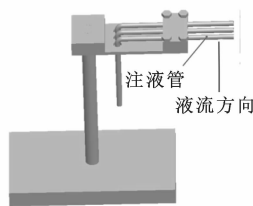


图 2 注液管结构

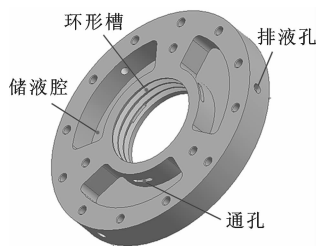


图 3 水槽主体结构

水槽具有 3 个互成 120° 夹角的储液腔,通过向其中任何一个或两个腔体注液并产生残余液体,即可合成圆周上任何方向的力,储液腔扇形夹角均为 90°,其平衡能力计算如下。

把储液腔内的液体想象成无数个液滴微元,那么每个液滴微元对储液腔的离心力合力为

$$df = dmr\omega^2 \cos\varphi \quad (1)$$

式中: dm 为水滴微元的质量; ω 为转速; r 为水滴微元所在半径。

如图 4 所示, dm 的求解如下

$$dm = \rho dV = \rho h ds = \rho h r d\varphi dr \quad (2)$$

式中: ρ 为液体密度; dV 为水滴微元体积; h 为储液腔高度; ds 为水滴微元面积; $d\varphi$ 为水滴微元夹角。

由于储液腔是对称结构,水滴微元离心力的合

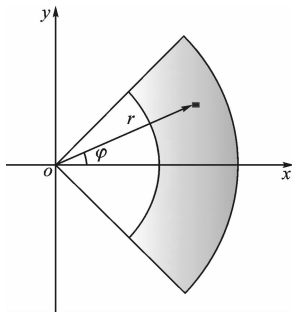


图 4 微元体分析

力方向在其对称中心,其合力如下

$$f = \iint dmr\omega^2 = \rho h \omega^2 \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 \cos\varphi dr d\varphi = \frac{2^{1/2}}{3} \rho h \omega^2 (R_{\max}^3 - R_{\min}^3) \tag{3}$$

式中: $R_{\max}$ 为储液腔的最大半径; $R_{\min}$ 为储液腔的最小半径。合力 f 为一个储液腔单腔的最大平衡能力,相邻两腔平衡能力也为 f 。

2 储液腔内液体的离心力与液位半径的关系

相同质量的液体处于不同的液位半径时提供的离心力不同,因此准确确定储液腔内液体的离心力与液位半径的关系,对于精确计算注液量非常关键,对实现流量的精确控制和快速在线动平衡非常重要。储液腔内液体的离心力与液位半径的关系为

$$f = \frac{2^{1/2}}{3} \rho h \omega^2 (R^3_{\max} - R^3) \tag{4}$$

式中: R 为储液腔内液体的液位半径。

假设 $\rho=1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $h=0.02\text{ m}$, $\omega=2\,500\text{ r/min}$,则储液腔内液体产生的离心力 f 与液位半径 R 的关系如图 5 所示。储液腔内液体产生的离心力 f 随储液腔内液位半径 R 的减小而增大,这是因为储液腔内液位半径减小时,储液腔内液体增加,液体所产生的离心力增大。

当液位半径为 R 时,储液腔内液体的质量为

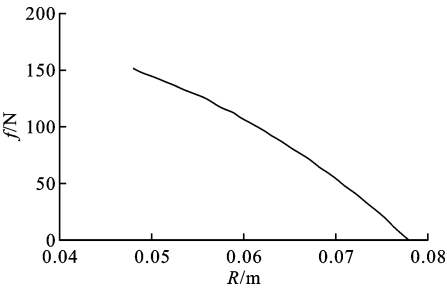


图 5 储液腔内液体产生的离心力与液位半径的关系

$$m = 0.25 \rho h \pi (R^2_{\max} - R^2) \tag{5}$$

储液腔内液体的质量 m 与液位半径 R 的关系如图 6 所示。储液腔内液位半径减小,储液腔内液体的质量增加。

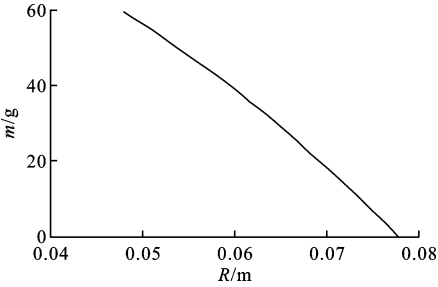


图 6 储液腔内液体的质量与液位半径的关系

3 节流阀参数测定

本文提出的平衡装置采用简易短孔型节流阀作为排液模块,因为短孔加工比较容易。短孔是指孔的长度 l 与直径 d 的比值为 $0.5\sim 4.0$,即 $0.5 < l/d \leq 4.0$ 。流经短孔的流量^[7]为

$$q = C_d A_0 (2\Delta p/\rho)^{1/2} \tag{6}$$

式中: C_d 为流量系数; A_0 为小孔的截面积; Δp 为小孔前后压力差。由式(6)可知,流量 q 与小孔的截面积 A_0 、小孔前后的压力差 Δp 成正比,与液体的密度 ρ 成反比,而与液体的黏度无关。由流体力学可知,当液流处于不同的收缩状态时, C_d 会有很大的不同。因此,试图从理论计算的方式确定 C_d 非常困难,采用实验的方法来测定 C_d 就很有必要。

排液节流阀结构如图 7 所示,短孔型节流阀安装在水槽主体外圆的螺纹孔上,储液腔的平衡液在离心力的作用下经开有微孔的节流薄片甩出。如图 7 所示,短孔型简易节流阀由两个中空的 M12 内六角螺栓、垫片和开有微孔的薄片 3 部分组成。其中 2 个内六角螺栓开有通孔便于液体从其中排出,采用此结构内六角螺栓也便于停机拆卸。采用激光加工微孔薄片,可以加工出所需规格参数的微孔,因此通过更换不同直径的薄片可以得到不同参数的节流阀,极大地降低了成本。

采用迭代算法建立排液理论模型,求解节流阀相关参数。假设砂轮转速为 ω ,从 0 时刻开始以流量 q_i 注液,到 t_0 时刻停止注液,同时从 0 时刻开始排液,到 t_1 时刻排完所有液体。当 $Q_r=0$ 时, t_1 即为所求的从开始注液到排完所有液体所用时间。在一定的转速下,向储液腔内注入一定质量的液体,多次测量从开始注液到排完所有液体所用的时间,并

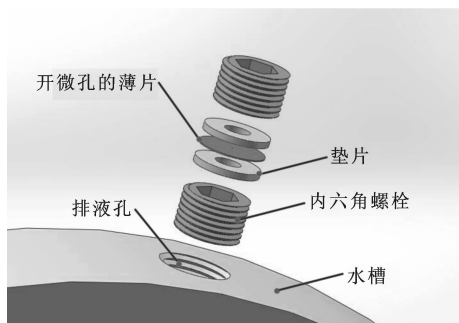


图7 节流阀结构及安装图

求平均值 t_2 。

当采用短孔型节流阀时,腔体内储液量 Q_r 与时间 t 的关系为

$$Q_r(t) = \int_0^t \left(q_i - C_d A_0 \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{1/2} \right) dt = \int_0^t \left(q_i - C_d A_0 \left(\frac{2}{\rho} \frac{\alpha \omega^2}{R_{\max}} \frac{1}{3} (R_{\max}^3 - R^3) \right)^{1/2} \right) dt = \int_0^t \left(q_i - C_d A_0 \omega \left(\frac{2}{3R_{\max}} \right)^{1/2} (R_{\max}^3 - R^3)^{1/2} \right) dt \quad (7)$$

在 dt 时间内注液量 dQ_i 为

$$dQ_i = q_i dt \quad (8)$$

$$Q_r(t) = h \frac{\pi}{4} (R_{\max}^2 - R^2) = dQ_i + Q_r^{t-1} - dQ_o \quad (9)$$

将 t 时刻储液腔内液位半径 R 用 $t + \frac{1}{2} dt$ 的液位半径表示,则 t 时刻储液腔内液位半径为

$$R = \left(R_{\max}^2 - \frac{4(dQ_i - dQ_o + Q_r^{t-1})}{\pi h} \right)^{1/2} \quad (10)$$

采用打靶法测定流量系数 C_d 。假定 $C_d = m$, 据此计算储液腔的液体从注入到排完所用的总时间 t_1 , 实验测量储液腔的液体从注入到排完所用的总时间 t_2 , 若 $|t_1 - t_2| > \delta$ (δ 为允许误差), 修改 m 的值, 重新计算 t_1 , 直到 $|t_1 - t_2| < \delta$, 则可认为 $C_d = m$ 。打靶法测定流程如图8所示。

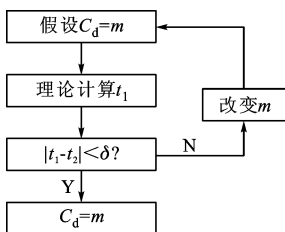


图8 打靶法测定流量系数的流程

对于同一结构参数的节流阀,不同转速下流量系数 C_d 变化不大。如图9所示,激光打孔时可把激

光脉冲宽度分成5个小段,每一小段激光在材料上形成不同内径的小孔,5段激光脉冲全部作用在材料上后,就形成了一个有锥度的微孔^[8]。排液过程杂质堵塞微孔会使节流阀孔径变小,所以对微孔面积 A 进行标定也非常必要。

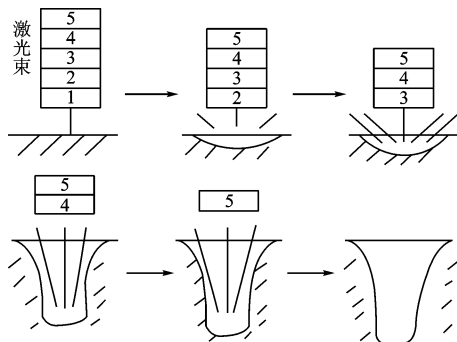


图9 激光加工微孔流程

最后,将 C_d 与 A 整合为一个参数 C_q , 则流经短孔的流量公式为

$$q = C_d A_0 \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{1/2} = C_q \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{1/2} \quad (11)$$

这样就将与节流阀有关的参数整合为一个参数, 进而实现流量的精确控制。

4 注排液式在线动平衡实验

为了验证注排液式砂轮在线动平衡装置的效果,搭建磨床砂轮实验台来模拟实际工况。实验台如图10所示,由注液模块、排液模块、平衡模块、电机驱动模块、实验台底座等构成。平衡模块与电机连接在一起,排液模块安装在平衡模块上,计算机控制注液模块向平衡模块内注液,并通过排液模块排液,电机调速器控制电机的转速。电机选择的是西玛 Z2-12 直流电机,电机的额定功率为 1.1 kW,最大转速为 3 000 r/min。电机调速器采用的是单相直流电机调速器,工控机采用研华工控机。选用电磁阀作为注液的设备,通过工控机输入开关量来控制电路的通断,从而控制电磁阀的开关。电磁阀的型号为 ASCO8262G001,开关量控制卡采用研华的 PCL725 开关量输入输出卡。短孔型简易节流阀由两个开孔的 M12 内六角螺栓、垫片和开有微孔的薄片 3 部分组成。采用激光加工微孔薄片,可以加工出所需规格参数的微孔。采用的传感器为 ZA120 系列电涡流传感器,灵敏度为 20 mm/V;数据采集箱为 C-Book 系列,采样频率最高为 200 kHz。

如图11所示,本文基于以上注排液式砂轮在线动平衡技术,针对磨床砂轮,开发了一套基于 Lab-

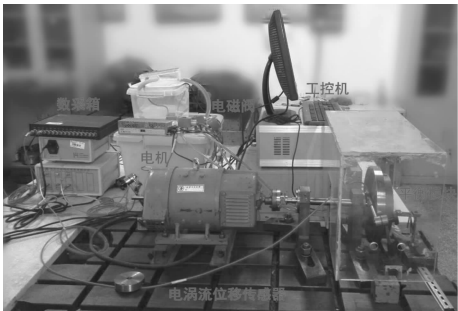


图 10 注排液式在线动平衡实验台

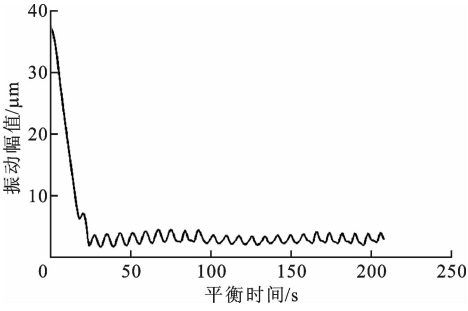


图 13 注排液式动平衡转频振动的变化情况

VIEW 的在线动平衡系统。该系统实时对磨床振动监测、失衡量计算、注液量计算、注液控制以及液位维护等,实现砂轮在不停机状态下的在线动平衡。

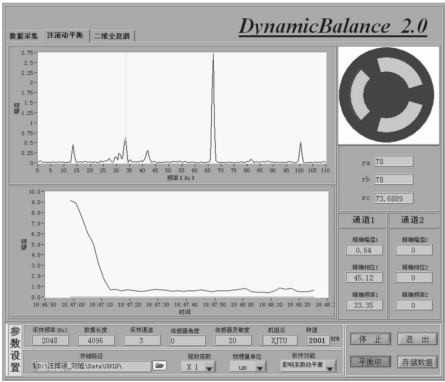


图 11 注排液式在线动平衡系统

实验转速为 2 000 r/min,进行初始动平衡后,在失衡盘 0°处添加 7.08 g 试重模拟转子失衡。动平衡实验中测得轴振动的幅值变化如图 12 所示,振动幅值由 9.13 μm 下降到 1.31 μm,下降达 87.62%,动平衡效果显著。

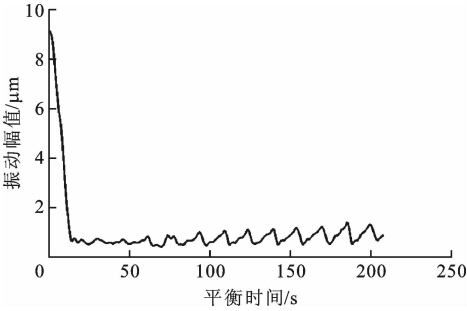


图 12 注排液式动平衡转频振动的变化情况

实验转速为 2 700 r/min,进行初始动平衡后,在失衡盘 120°处添加 7.08 g 和 180°处加 4.5 g 试重来模拟失衡。注排液动平衡实验中测得轴振动的幅值变化如图 13 所示,振动幅值由 37.66 μm 下降到 4.05 μm,下降达 89.25%,平衡效果显著。同时,通过对平衡腔内液位的维持,使转轴的振幅在较长的时间内基本保持不变。

5 结 论

本文提出了一种新的注排液式砂轮在线动平衡方法,并设计了平衡装置与注排液式在线动平衡软件系统。通过控制注入平衡腔内的液体与计算排出平衡腔的液体,控制平衡腔内残余液体质量,进而利用残余液体提供合适的平衡校正量。分析平衡腔内液体的离心力与腔内液位半径的关系,建立动态注液模型,实现了注排液式砂轮在线动平衡。

(1)设计的平衡装置拥有持续的平衡能力,解决了现有注液式在线平衡腔满而丧失平衡能力的问题,排液模块采用的节流阀结构简单,平衡头无需引入电流。

(2)采用打靶法对采用的短孔型节流阀排液模块进行参数标定,分析影响节流阀参数的因素,对现有的流经短孔的流量公式进行修正,建立流量控制模型,可以精确计算平衡腔内残余液体。

(3)动平衡实验结果表明,在砂轮转速为 2 000 r/min 时,校正后振动幅值下降达 87.62%;在砂轮转速为 2 700 r/min 时,校正后振动幅值下降达 89.25%,验证了本文提出的动平衡方法的效果。由于实验台电机转速的限制,平衡实验仅在 2 700 r/min 以内进行,但该方法不局限于此转速,高转速时将更能凸显此方法的优势。

参考文献:

[1] 潘鑫,吴海琦,高金吉. 气压液体式磨床自动平衡装置控制策略与实验研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 1-5.

PAN Xin, WU Haiqi, GAO Jinji. Design and performance analysis of hydrojet-type balancing device for high-speed machine tool spindle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 1-5.

[2] 李长河,原所先,修世超. 超高速磨削中的砂轮自动平衡技术 [J]. 新技术新工艺, 2004(5): 29-31.

(下转第 102 页)