



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103676773 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 26

(21) 申请号 201310571195. 0

(22) 申请日 2013. 11. 13

(71) 申请人 西安理工大学

地址 710048 陕西省西安市金花南路 5 号

(72) 发明人 孔令飞 李言 孙瑾 季昂

孟维昌 牛晗 王彦岭

(74) 专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214

代理人 李娜

(51) Int. Cl.

G05B 19/18 (2006. 01)

B23Q 11/00 (2006. 01)

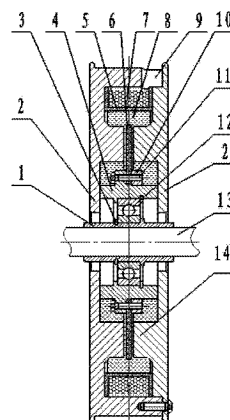
权利要求书4页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

振动控制器及其应用于深孔加工刀具系统的最优控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种振动控制器,包括中空的导套,导套的外壁套有轴承,轴承外壁过盈配合有环形活塞套,环形活塞套的外壁固定套有圆盘,圆盘的外侧设有环形的线圈支撑套,线圈支撑套与圆盘不接触,线圈支撑套上缠有线圈,导套的两端均套设有外端盖,两个外端盖的外侧互相连接,任意一个外端盖上设有电源线连接通道且与所述线圈支撑套的U形内腔连通;利用封装在振动控制器内磁流变液体对刀具系统的阻尼进行修正,使得该控制器具有高精度和高敏捷度,以及阻尼值调整范围宽的优势。本发明还公开了一种振动控制器应用于深孔加工刀具系统的最优控制方法,使得深孔加工刀具系统实现最优振动状态,加工出的深孔精度高、质量好。



1. 振动控制器,其特征在于,包括中空的导套(1),导套(1)的外壁套有轴承(12),轴承(12)外壁过盈配合有环形活塞套(4),环形活塞套(4)的外壁固定套有圆盘(6),圆盘(6)的外侧设有环形的线圈支撑套(5),线圈支撑套(5)与圆盘(6)不接触,线圈支撑套(5)的截面为U形,线圈支撑套(5)上缠有线圈(7),所述导套(1)的两端均套设有外端盖(2),两个外端盖(2)的外侧互相连接,任意一个外端盖(2)上设有与所述线圈支撑套(5)的U形内腔连通的电源线连接通道(9)。

2. 如权利要求1所述的振动控制器,其特征在于,所述导套(2)上位于轴承(12)的一侧设有凸起,轴承(12)的另一侧设有轴承弹性挡圈(3),轴承弹性挡圈(3)套在导套(2)上。

3. 如权利要求1所述的振动控制器,其特征在于,所述环形活塞套(4)的外壁套设有挡圈(10),沿环形活塞套(4)外壁的一周固设有凸圈,挡圈(10)和凸圈之间通过螺钉(11)连接圆盘(6)。

4. 如权利要求1所述的振动控制器,其特征在于,所述两个外端盖(2)的内壁与环形活塞套(4)、线圈支撑套(5)构成封闭腔,封闭腔内充有磁流变液体(8),两个外端盖(2)的内壁靠近圆盘(6)的位置处均设有凸块,每个凸块均与圆盘(6)之间留有间隙。

5. 如权利要求4所述的振动控制器,其特征在于,所述间隙的宽度为 $0.8 \sim 1\text{mm}$ 。

6. 一种将权利要求1所述的振动控制器应用于深孔加工刀具系统的最优控制方法,其特征在于,采用振动控制器,其结构为:包括中空的导套(1),导套(1)的外壁套有轴承(12),轴承(12)外壁过盈配合有环形活塞套(4),环形活塞套(4)的外壁固定套有圆盘(6),圆盘(6)的外侧设有环形的线圈支撑套(5),线圈支撑套(5)与圆盘(6)不接触,线圈支撑套(5)的截面为U形,线圈支撑套(5)上缠有线圈(7),所述导套(1)的两端均套设有外端盖(2),两个外端盖(2)的外侧互相连接,任意一个外端盖(2)上设有与所述线圈支撑套(5)的U形内腔连通的电源线连接通道(9);

所述导套(2)上位于轴承(12)的一侧设有凸起,轴承(12)的另一侧设有轴承弹性挡圈(3),轴承弹性挡圈(3)套在导套(2)上;

所述环形活塞套(4)的外壁套设有挡圈(10),沿环形活塞套(4)外壁的一周固设有凸圈,挡圈(10)和凸圈之间通过螺钉(11)连接圆盘(6);

所述两个外端盖(2)的内壁与环形活塞套(4)、线圈支撑套(5)构成封闭腔,封闭腔内充有磁流变液体(8),两个外端盖(2)的内壁靠近圆盘(6)的位置处均设有凸块,每个凸块均与圆盘(6)之间留有间隙;

所述间隙的宽度为 $0.8 \sim 1\text{mm}$;

具体按照以下步骤实施:

步骤1,建立深孔加工刀具系统的理论计算模型;

步骤2,采集深孔加工刀具系统的实际振动信息,修正步骤1中理论计算模型的参数,得到修正模型;

步骤3,根据步骤2中的修正模型,建立引入振动控制器后的可控模型;

步骤4,根据步骤3中的可控模型,判断模型的可控性、计算最优控制力及最优控制电流 I^* 。

7. 如权利要求6所述的最优控制方法,其特征在于,所述的步骤1具体按照以下步骤实施:

由刀具、刀杆、导套和辅助支撑构成深孔加工刀具系统,根据铁摩辛柯梁理论,建立该深孔加工刀具系统的理论计算模型:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F};$$

式中, $\mathbf{M}$ 为系统质量阵, $\mathbf{C}$ 为系统阻尼阵, $\mathbf{K}$ 为系统刚度阵, $\mathbf{q}$ 为钻杆的位移矢量, $\mathbf{q} = (x_1, y_1, \dots, x_i, y_i)$, 其中 x_i 和 y_i 分别是刀杆上的第 i 单元在水平方向和竖直方向上的位移; $\mathbf{F}$ 为刀具系统所承受的外激力, 包括切削力 $\mathbf{F}_c$ 和不平衡力 $\mathbf{F}_u$, 切削力 $\mathbf{F}_c$ 表示为 $\mathbf{F}_c = [0, \dots, -f_{cx}, -f_{cy}, 0, 0]^T$, 其中 $f_{cx} = f_{c0} \sin \omega t$, $f_{cy} = f_{c0} \cos \omega t$, f_{c0} 为切削力波动量, ω 为钻杆转速, t 为时间, 不平衡力 $\mathbf{F}_u$ 表示为:

$$\mathbf{F}_u = \begin{Bmatrix} m^e e_{x_i} \omega^2 \cos \omega t + m^e e_{y_i} \omega^2 \sin \omega t \\ m^e e_{y_i} \omega^2 \cos \omega t - m^e e_{x_i} \omega^2 \sin \omega t + m^e g \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ m^e e_{x_i} \omega^2 \cos \omega t + m^e e_{y_i} \omega^2 \sin \omega t \\ m^e e_{y_i} \omega^2 \cos \omega t - m^e e_{x_i} \omega^2 \sin \omega t + m^e g \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{Bmatrix},$$

其中 e_{x_i} 和 e_{y_i} 分别是钻杆上的第 i 单元在水平方向和竖直方向上的偏心量; m^e 为单元质量; g 为重力加速度。

8. 如权利要求6所述的最优控制方法, 其特征在于, 所述的步骤2具体按照以下步骤实施:

在刀杆上设置位移传感器采集刀具的实际振动信息 x' 和 y' , 其中 x' 和 y' 分别为刀具在水平方向和竖直方向的实际振动幅值, 然后, 利用圆度误差仪测得被加工深孔的实际圆度误差值 $\Delta R'$;

再根据步骤1中理论计算模型式计算出位移矢量 $\mathbf{q}$, 通过 $\Delta R = \sqrt{x^2 + y^2}$, 计算出刀具所加工深孔的圆度误差理论值 ΔR ;

将实际值 $\Delta R'$ 与理论值 ΔR 作比较, 若理论值与实际值的误差大于理论值的5%, 则修正步骤1中 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 的数值, 直到满足误差小于理论值的5%, 修正完成, 修正的具体方法是: $\Delta R' - \Delta R > 0$, 那么增大 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 的数值; 若 $\Delta R' - \Delta R < 0$, 则减小 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 的数值, 修正完毕后, 得到深孔加工刀具系统的修正模型:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} = \mathbf{F},$$

式中, $\mathbf{M}^*$ 为修正后的系统质量阵, $\mathbf{C}^*$ 为修正后的系统阻尼阵, $\mathbf{K}^*$ 为修正后的系统刚度阵。

9. 如权利要求6所述的最优控制方法, 其特征在于, 所述的步骤3具体按照以下步骤实施:

在钻杆上安装振动控制器, 根据步骤2中的修正模型式, 建立包括振动控制器的深孔加工刀具系统的可控模型:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} + \mathbf{f} = \mathbf{F},$$

式中, $\mathbf{f}$ 为振动控制器的输出力。

10. 如权利要求 6 所述的最优控制方法, 其特征在于, 所述的步骤 4 具体按照以下步骤实施:

由步骤 3 中的可控模型式可知, 刀具系统的最优控制运动方程为

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} + \mathbf{f} = \mathbf{0}$$

;

4.1) 可控模型的状态空间方程

根据比例微分控制系统的原理, 控制向量为上式中的 $\mathbf{f}$, 并令状态变量 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \ \mathbf{X}_2 \ \mathbf{X}_3 \ \mathbf{X}_4]^T = [\mathbf{x} \ \mathbf{y} \ \dot{\mathbf{x}} \ \dot{\mathbf{y}}]^T$, 则可控模型式状态空间方程为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U},$$

式中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ -\mathbf{M}^{*-1}\mathbf{K}^* & -\mathbf{M}^{*-1}\mathbf{C}^* \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{*-1} \end{bmatrix}$, $\mathbf{U} = \mathbf{f}$, $\mathbf{E}$ 为单位矩阵;

4.2) 判断系统的可控性

将最优控制运动方程中的 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 构成可控性矩阵 δ , 则 $\delta = [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{N_1-1}\mathbf{B}]$, 其中 N_1 是状态方程的个数;

若可控性矩阵 δ 的秩为 N_1 , 即矩阵 δ 满秩, 则该系统可控, 可以对该系统进行最优控制; 反之, 则该系统不可控, 无法对该系统进行最优控制;

4.3) 最优反馈的计算方法

若经步骤 4.2) 判断该系统可控, 引入最优控制性能指标 J , $J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{L} \mathbf{U}) dt$,

其中 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{L}$ 分别是对状态变量和控制向量的加权矩阵;

若令最优控制性能指标 J 取最小值, 则根据状态空间方程式

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} + \mathbf{f} = \mathbf{F} \text{ 得到的 } \mathbf{U}(t) \text{ 即为最优反馈,}$$

$$\mathbf{U}(t) = -\mathbf{L}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{X}(t),$$

又因为有最优反馈矩阵 $\mathbf{K}_f = -\mathbf{L}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$, 其中 $\mathbf{P}$ 为黎卡提矩阵方程 $\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}$ 的解,

则求得最优反馈 $\mathbf{U}$ 为:

$$\mathbf{U} = \mathbf{f} = \mathbf{K}_f \mathbf{X}(t) = -[\mathbf{K}_a \ \mathbf{K}_b] \mathbf{X}(t),$$

再将最优反馈 $\mathbf{U}$ 代入步骤 3 的可控模型式中, 则得到最优反馈控制下的可控模型:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{C}^* - \mathbf{K}_b) \dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K}^* - \mathbf{K}_a) \mathbf{q} = \mathbf{F};$$

4.4) 计算最优控制电流值

为了计算最优控制电流值, 必须构建控制力 $\mathbf{f}$ 与控制电流 $\mathbf{I}$ 的关系表达式。因此, 用 Bing-ham 粘性模型将控制力描述为如下解析形式:

$$\mathbf{f} = 2\pi (R^2 - r_0^2) \tau_y + \eta v \frac{\pi (R^2 - r_1^2)}{d_1} + \eta v \frac{\pi (r_1^2 - r_2^2)}{d_2},$$

式中, τ_y 是与磁场相关的剪切应力, η 为磁流变液粘性系数, v 为活塞圆盘移动速度, R 为控制器圆盘大径, r_0 为圆盘中孔半径, r_1 为中心距凸块的距离, r_2 为环形活塞套半径, d_1 为凸块与圆盘之间的间隙, d_2 为凸块厚度, τ_y 依据所采用的磁流液体型号, 并结合 Mathematics 软件拟合得到磁场强度 H 与 τ_y 的关系表达式:

$$\tau_y = \alpha_1 H^3 - \alpha_2 H^2 + \alpha_3 H - \alpha_4,$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 均为常值系数;

此外, 由安培环路定理知, 磁场强度表示为

$$H = \frac{NI}{S\mu_0\mu_f R_m},$$

式中, N 为线圈匝数, I 为输入电流, S 为磁路截面积, μ_0 为真空磁导率, μ_f 为磁流液体相对磁导率, R_m 为磁路总磁阻;

结合

$$H = \frac{NI}{S\mu_0\mu_f R_m}、f = 2\pi(R^2 - r_0^2)\tau_y + \eta v \frac{\pi(R^2 - r_1^2)}{d_1} + \eta v \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{d_2} \quad \text{和}$$

$\tau_y = \alpha_1 H^3 - \alpha_2 H^2 + \alpha_3 H - \alpha_4$, 建立电流与控制力关系式:

$$f = \beta_1 I^3 - \beta_2 I^2 + \beta_3 I + \beta_4 v - \beta_5,$$

其中, I 为输入振动控制器的控制电流值; β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 均为常值系数;

依据步骤 4.3) 中公式 $M^* \ddot{q} + C^* \dot{q} + K^* q + f = 0$, 求得最优反馈 U , 并将其代入公式 $f = \beta_1 I^3 - \beta_2 I^2 + \beta_3 I + \beta_4 v - \beta_5$, 求得最优控制电流 I^* 。

振动控制器及其应用于深孔加工刀具系统的最优控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械设计与制造技术领域,具体涉及一种振动控制器,本发明还涉及该振动控制器应用于深孔加工刀具系统的最优控制方法。

背景技术

[0002] 深孔钻削是一种极具附加价值的切削工艺,这是传统钻削方法所不能及的。在现代制造领域,有很多专门用途的深孔制件,例如据欧洲空中客车公司统计,其在大型客机制造中就涉及多达 5000 多个加工孔。这些零部件孔的结构形状与尺寸精度直接决定了关键部件的工作性能和效率。然而,由于深孔钻削机理的复杂性及加工条件的多样性,如何在保证加工正常运行的条件下,实时准确地识别和精确地控制刀具的运行状态从而确保孔的加工精度一直是深孔加工研究的热点和关键问题。近年来国内外学者关于深孔加工刀具的动态稳定性问题进行了大量的研究,但这些研究的内容主要集中在对深孔加工刀具系统振动行为的仿真分析及其计算方法上,很难应用到实际的加工生产中,加工质量不易控制。

[0003] 研究能够对刀具再生振动或颤振进行主动控制且易于实现刀具系统刚度及阻尼的自调整智能控制器,对推动机床的创新开发,特别是对深孔加工机床的发展具有重要意义。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种振动控制器,以解决现有方法无法对深孔加工刀具的振动状态进行控制,从而不能保证刀具所加工深孔的质量的问题。

[0005] 本发明的另一目的是提供一种振动控制器应用于深孔加工刀具系统的最优控制方法。

[0006] 本发明所采用的技术方案是,振动控制器,包括中空的导套,导套的外壁套有轴承,轴承外壁过盈配合有环形活塞套,环形活塞套的外壁固定套有圆盘,圆盘的外侧设有环形的线圈支撑套,线圈支撑套与圆盘不接触,线圈支撑套的截面为 U 形,线圈支撑套上缠有线圈,导套的两端均套设有外端盖,两个外端盖的外侧互相连接,任意一个外端盖上设有与所述线圈支撑套的 U 形内腔连通的电源线连接通道;

[0007] 导套上位于轴承的一侧设有凸起,轴承的另一侧设有轴承弹性挡圈,轴承弹性挡圈套在导套上;

[0008] 环形活塞套的外壁套设有挡圈,沿环形活塞套外壁的一周固设有凸圈,挡圈和凸圈之间通过螺钉连接圆盘;

[0009] 两个外端盖的内壁与环形活塞套、线圈支撑套构成封闭腔,封闭腔内充有磁流变液体,两个外端盖的内壁靠近圆盘的位置处均设有凸块,每个凸块均与圆盘之间留有间隙;

[0010] 间隙的宽度为 $0.8 \sim 1\text{mm}$ 。

[0011] 本发明所采用的另一技术方案是,振动控制器应用于深孔加工刀具系统的最优控

制方法,具体按照以下步骤实施:

[0012] 步骤 1,建立深孔加工刀具系统的理论计算模型;

[0013] 步骤 2,采集深孔加工刀具系统的实际振动信息,修正步骤 1 中理论计算模型的参数,得到修正模型;

[0014] 步骤 3,根据步骤 2 中的修正模型,建立引入振动控制器后的可控模型;

[0015] 步骤 4,根据步骤 3 中的可控模型,判断模型的可控性、计算最优控制力及最优控制电流 I^* 。

[0016] 本发明的特点还在于,

[0017] 其中的步骤 1 具体按照以下步骤实施:

[0018] 由刀具、刀杆、导套和辅助支撑构成深孔加工刀具系统,根据铁摩辛柯梁理论,建立该深孔加工刀具系统的理论计算模型:

$$[0019] \quad \mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F};$$

[0020] 式中, $\mathbf{M}$ 为系统质量阵, $\mathbf{C}$ 为系统阻尼阵, $\mathbf{K}$ 为系统刚度阵, $\mathbf{q}$ 为钻杆的位移矢量, $\mathbf{q} = (x_1, y_1, \dots, x_i, y_i)$, 其中 x_i 和 y_i 分别是刀杆上的第 i 单元在水平方向和竖直方向上的位移; $\mathbf{F}$ 为刀具系统所承受的外激力, 包括切削力 F_c 和不平衡力 F_u , 切削力 F_c 表示为 $F_c = [0, \dots, -f_{cx}, -f_{cy}, 0, 0]^T$, 其中 $f_{cx} = f_{c0} \sin \omega t$, $f_{cy} = f_{c0} \cos \omega t$, f_{c0} 为切削力波动量, ω 为钻杆转速, t 为时间, 不平衡力 F_u 表示为:

$$[0021] \quad \mathbf{F}_u = \begin{Bmatrix} m^e e_{x_1} \omega^2 \cos \omega t + m^e e_{y_1} \omega^2 \sin \omega t \\ m^e e_{y_1} \omega^2 \cos \omega t - m^e e_{x_1} \omega^2 \sin \omega t + m^e g \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ m^e e_{x_i} \omega^2 \cos \omega t + m^e e_{y_i} \omega^2 \sin \omega t \\ m^e e_{y_i} \omega^2 \cos \omega t - m^e e_{x_i} \omega^2 \sin \omega t + m^e g \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{Bmatrix},$$

[0022] 其中 e_{x_i} 和 e_{y_i} 分别是钻杆上的第 i 单元在水平方向和竖直方向上的偏心量; m^e 为单元质量; g 为重力加速度。

[0023] 其中的步骤 2 具体按照以下步骤实施:

[0024] 在刀杆上设置位移传感器采集刀具的实际振动信息 x' 和 y' , 其中 x' 和 y' 分别为刀具在水平方向和竖直方向的实际振动幅值, 然后, 利用圆度误差仪测得被加工深孔的实际圆度误差值 $\Delta R'$;

[0025] 再根据步骤 1 中理论计算模型式计算出位移矢量 $\mathbf{q}$, 通过 $\Delta R = \sqrt{x^2 + y^2}$, 计算出刀具所加工深孔的圆度误差理论值 ΔR

[0026] 将实际值 $\Delta R'$ 与理论值 ΔR 作比较, 若理论值与实际值的误差大于理论值的 5%, 则修正步骤 1 中 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 的数值, 直到满足误差小于理论值的 5%, 修正完成, 修正的具体方法是: $\Delta R' - \Delta R > 0$, 那么增大 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 的数值; 若 $\Delta R' - \Delta R < 0$, 则减小 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 的数值, 修

正完毕后,得到深孔加工刀具系统的修正模型:

$$[0027] \quad \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} = \mathbf{F},$$

[0028] 式中, $\mathbf{M}^*$ 为修正后的系统质量阵, $\mathbf{C}^*$ 为修正后的系统阻尼阵, $\mathbf{K}^*$ 为修正后的系统刚度阵。

[0029] 其中的步骤 3 具体按照以下步骤实施:

[0030] 在钻杆上安装振动控制器,根据步骤 2 中的修正模型式,建立包括振动控制器的深孔加工刀具系统的可控模型:

$$[0031] \quad \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} + \mathbf{f} = \mathbf{F},$$

[0032] 式中, $\mathbf{f}$ 为振动控制器的输出力。

[0033] 其中的步骤 4 具体按照以下步骤实施:

[0034] 由步骤 3 中的可控模型式可知,刀具系统的最优控制运动方程为

$$[0035] \quad \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} + \mathbf{f} = 0$$

[0036] 4.1) 可控模型的状态空间方程

[0037] 根据比例微分控制系统的原理,控制向量为上式中的 $\mathbf{f}$,并令状态变量 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_2 \quad \mathbf{X}_3 \quad \mathbf{X}_4]^T = [\mathbf{x} \quad \mathbf{y} \quad \dot{\mathbf{x}} \quad \dot{\mathbf{y}}]^T$,则可控模型式状态空间方程为:

$$[0038] \quad \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U},$$

[0039] 式中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{E} \\ -\mathbf{M}^{*-1}\mathbf{K}^* & -\mathbf{M}^{*-1}\mathbf{C}^* \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{*-1} \end{bmatrix}$, $\mathbf{U} = \mathbf{f}$, $\mathbf{E}$ 为单位矩阵;

[0040] 4.2) 判断系统的可控性

[0041] 将最优控制运动方程中的 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 构成可控性矩阵 δ ,则 $\delta = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{N_1-1}\mathbf{B}]$,其中 N_1 是状态方程的个数;

[0042] 若可控性矩阵 δ 的秩为 N_1 ,即矩阵 δ 满秩,则该系统可控,可以对该系统进行最优控制;反之,则该系统不可控,无法对该系统进行最优控制;

[0043] 4.3) 最优反馈的计算方法

[0044] 若经步骤 4.2) 判断该系统可控,引入最优控制性能指标 J ,

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{L} \mathbf{U}) dt, \text{ 其中 } \mathbf{Q} \text{ 和 } \mathbf{L} \text{ 分别是对状态变量和控制向量的加权矩阵};$$

[0045] 若令最优控制性能指标 J 取最小值,则根据状态空间方程式

$$[0046] \quad \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} + \mathbf{f} = \mathbf{F} \text{ 得到的 } \mathbf{U}(t) \text{ 即为最优反馈},$$

$$[0047] \quad \mathbf{U}(t) = -\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{X}(t),$$

[0048] 又因为有最优反馈矩阵 $\mathbf{K}_f = -\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}$,其中 $\mathbf{P}$ 为黎卡提矩阵方程

$$[0049] \quad \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \text{ 的解},$$

[0050] 则求得最优反馈 $\mathbf{U}$ 为:

$$[0051] \quad \mathbf{U} = \mathbf{f} = \mathbf{K}_f\mathbf{X}(t) = -[\mathbf{K}_a \quad \mathbf{K}_b]\mathbf{X}(t),$$

[0052] 再将最优反馈 $\mathbf{U}$ 代入步骤 3 的可控模型式中,则得到最优反馈控制下的可控模

型：

$$[0053] \quad M^* \ddot{q} + (C^* - K_b) \dot{q} + (K^* - K_a) q = F ;$$

[0054] 4.4) 计算最优控制电流值

[0055] 为了计算最优控制电流值,必须构建控制力 f 与控制电流 I 的关系表达式。因此,用 Bing-ham 粘性模型将控制力描述为如下解析形式：

$$[0056] \quad f = 2\pi(R^2 - r_0^2)\tau_y + \eta v \frac{\pi(R^2 - r_1^2)}{d_1} + \eta v \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{d_2},$$

[0057] 式中, τ_y 是与磁场相关的剪切应力, η 为磁流变液粘性系数, v 为活塞圆盘移动速度, R 为控制器圆盘大径, r_0 为圆盘中孔半径, r_1 为中心距凸块的距离, r_2 为环形活塞套半径, d_1 为凸块与圆盘之间的间隙, d_2 为凸块厚度, τ_y 依据所采用的磁流液体型号,并结合 Mathematics 软件拟合得到磁场强度 H 与 τ_y 的关系表达式：

$$[0058] \quad \tau_y = \alpha_1 H^3 - \alpha_2 H^2 + \alpha_3 H - \alpha_4,$$

[0059] 式中, α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 均为常值系数；

[0060] 此外,由安培环路定理知,磁场强度表示为

$$[0061] \quad H = \frac{NI}{S\mu_0\mu_f R_m},$$

[0062] 式中, N 为线圈匝数, I 为输入电流, S 为磁路截面积, μ_0 为真空磁导率, μ_f 为磁流液体相对磁导率, R_m 为磁路总磁阻；

[0063] 结合

$$[0064] \quad H = \frac{NI}{S\mu_0\mu_f R_m}, \quad f = 2\pi(R^2 - r_0^2)\tau_y + \eta v \frac{\pi(R^2 - r_1^2)}{d_1} + \eta v \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{d_2}$$

和 $\tau_y = \alpha_1 H^3 - \alpha_2 H^2 + \alpha_3 H - \alpha_4$, 建立电流与控制力关系式：

$$[0065] \quad f = \beta_1 I^3 - \beta_2 I^2 + \beta_3 I + \beta_4 v - \beta_5,$$

[0066] 其中, I 为输入振动控制器的控制电流值； β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 均为常值系数；

[0067] 依据步骤 4.3) 中公式 $M^* \ddot{q} + C^* \dot{q} + K^* q + f = 0$, 求得最优反馈 U , 并将其代入公式 $f = \beta_1 I^3 - \beta_2 I^2 + \beta_3 I + \beta_4 v - \beta_5$, 求得最优控制电流 I^* 。

[0068] 本发明的有益效果是,利用封装在振动控制器内磁流变液体的快速、连续及可逆转化的特点,通过磁流变液体对刀具系统的阻尼进行修正,使得该控制器具有高精度和高敏捷度,以及阻尼值调整范围宽的优势,解决了现有方法无法对深孔加工刀具的振动状态进行控制,从而不能保证刀具所加工深孔的质量的问题。本发明的方法通过最优控制法求得使刀具振幅最小的最优电流值,使得深孔加工刀具系统实现最优振动状态,采用本方法的深孔加工刀具系统加工出的深孔精度高、质量好。

附图说明

[0069] 图 1 是本发明振动控制器的结构示意图；

[0070] 图 2 是本发明振动控制器的结构尺寸标注。

[0071] 图中,1. 导套,2. 外端盖,3. 轴承弹性挡圈,4. 环形活塞套,5. 线圈支撑套,6. 圆

盘,7. 线圈,8. 磁流变液体,9. 电源线连接通道,10. 挡圈,11. 螺钉,12. 轴承,13. 刀杆,14. 凸块。

具体实施方式

[0072] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0073] 本发明振动控制器的结构,如图 1 所示,包括中空的导套 1,导套 1 的外壁套有轴承 12,轴承 12 外壁过盈配合有环形活塞套 4,环形活塞套 4 的外壁固定套有圆盘 6,圆盘 6 的外侧设有环形的线圈支撑套 5,线圈支撑套 5 与圆盘 6 不接触,线圈支撑套 5 的截面为 U 形,线圈支撑套 5 上缠有线圈 7,导套 1 的两端均套设有外端盖 2,两个外端盖 2 的外侧互相连接,任意一个外端盖 2 上设有电源线连接通道 9 且与所述线圈支撑套 5 的 U 形内腔连通。

[0074] 其中,导套 1 上位于轴承 12 的一侧设有凸起,轴承 12 的另一侧设有轴承弹性挡圈 3,轴承弹性挡圈 3 套在导套 2 上;环形活塞套 4 的外壁套设有挡圈 10,沿环形活塞套 4 外壁的一周固设有凸圈,挡圈 10 和凸圈之间通过螺钉 11 连接圆盘 6;两个外端盖 2 的内壁与环形活塞套 4、线圈支撑套 5 构成封闭腔,封闭腔内充有磁流变液体 8,两个外端盖 2 的内壁靠近圆盘 6 的位置处均设有凸块 14,每个凸块 14 均与圆盘 6 之间留有间隙;间隙的宽度为 0.8 ~ 1mm。

[0075] 外端盖 2、线圈支撑套 5 与环形活塞套 4 构成的密闭腔体中注入磁流变液体 8,形成固体与液态逆变场。线圈 7 的正负极经由电源线连接通道 9 引出,用于联接外部电源。为了保证阻尼通道有足够的磁感应强度,外端盖 2 上设置的凸块 14 与圆盘 6 之间的间隙宽度为 0.8 ~ 1mm。外端盖 2 和圆盘 6 的材质均采用低碳钢,而线圈支撑套 5、环形活塞套 4 和挡圈 10 则采用铝制材料。轴承 12 与刀杆 13、聚四氟乙烯导套 1 之间采用过盈配合,并通过螺钉 11 将轴承 12、环形活塞套 4、挡圈 10 与圆盘 6 之间的运动关联起来。

[0076] 使用时,将刀杆 13 穿过导套 1,刀杆 13 与导套 1 为过盈配合,线圈 7 通过电源线连接通道 9 外接整流器,整流器通电后使得线圈 7 周围产生磁场,于是磁流变液体 8 在磁场的作用下,依据磁流变液体 8 可产生固液相变的原理,会导致磁流变液体 8 在固体与液态之间进行毫秒级快速可逆转化,进而影响了圆盘 6 和磁流变液体 8 接触面的阻尼值,由于圆盘 6、环形活塞套 4、导套 1 和刀杆 13 为组合件,故该阻尼值将直接影响刀杆 13 自身的振动状态。

[0077] 若增大线圈 7 中的电流,则会使密闭腔体内磁场增强,同时促使磁流变液体 8 相变固化使得圆盘 6 所承受的剪切阻尼力增大;反之,若减小线圈 7 中的电流,则会使得圆盘 6 所承受的剪切阻尼力减小。通过上述调整过程,最终达到利用改变磁流变液体 8 的剪切阻尼力,以实现深孔加工刀具系统阻尼值和刚度值进行主动调控的目的。

[0078] 本发明振动控制器应用于深孔加工刀具系统的最优控制方法,具体按照以下步骤实施:

[0079] 步骤 1,建立深孔加工刀具系统的理论计算模型;

[0080] 由刀具、刀杆、导套和辅助支撑构成深孔加工刀具系统,根据铁摩辛柯梁理论,建立该深孔加工刀具系统的理论计算模型:

$$[0081] \quad M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F \quad (1)$$

[0082] 式中, M 为系统质量阵, C 为系统阻尼阵, K 为系统刚度阵, q 为钻杆的位移矢量, q

$= (x_1, y_1, \dots, x_i, y_i)$, 其中 x_i 和 y_i 分别是刀杆上的第 i 单元在水平方向和竖直方向上的位移; F 为刀具系统所承受的外激力, 包括切削力 F_c 和不平衡力 F_u (即 $F = F_u + F_c$), 切削力 F_c 可表示为 $F_c = [0, \dots, -f_{cx}, -f_{cy}, 0, 0]^T$ 其中 $f_{cx} = f_{c0} \sin \omega t$, $f_{cy} = f_{c0} \cos \omega t$, f_{c0} 为切削力波动量, ω 为钻杆转速, t 为时间。不平衡力 F_u 可表示为:

$$[0083] \quad F_u = \begin{Bmatrix} m^e e_{x_i} \omega^2 \cos \omega t + m^e e_{y_i} \omega^2 \sin \omega t \\ m^e e_{y_i} \omega^2 \cos \omega t - m^e e_{x_i} \omega^2 \sin \omega t + m^e g \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ m^e e_{x_i} \omega^2 \cos \omega t + m^e e_{y_i} \omega^2 \sin \omega t \\ m^e e_{y_i} \omega^2 \cos \omega t - m^e e_{x_i} \omega^2 \sin \omega t + m^e g \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (2)$$

[0084] 其中 e_{x_i} 和 e_{y_i} 分别是钻杆上的第 i 单元在水平方向和竖直方向上的偏心量; m^e 为单元质量; g 为重力加速度。

[0085] 步骤 2, 采集深孔加工刀具系统的实际振动信息, 修正步骤 1 中理论计算模型的参数, 得到修正模型;

[0086] 在刀杆上设置位移传感器采集刀具的实际振动信息 x' 和 y' , 其中 x' 和 y' 分别为刀具在水平方向和竖直方向的实际振动幅值。然后, 利用圆度误差仪测得被加工深孔的实际圆度误差值 $\Delta R'$;

[0087] 再根据步骤 1 中理论计算模型式(1)计算出位移矢量 q , 通过 $\Delta R = \sqrt{x^2 + y^2}$, 计算出刀具所加工深孔的圆度误差理论值 ΔR ;

[0088] 将实际值 $\Delta R'$ 与理论值 ΔR 作比较, 若理论值与实际值的误差大于理论值的 5%, 则修正式(1)中 M 、 C 、 K 的数值, 直到满足误差小于理论值的 5%, 即修正完成, 修正的具体方法是: $\Delta R' - \Delta R > 0$, 那么增大 M 、 C 、 K 的数值; 若 $\Delta R' - \Delta R < 0$, 则减小 M 、 C 、 K 的数值, 修正完毕后, 得到深孔加工刀具系统的修正模型:

$$[0089] \quad M^* \ddot{q} + C^* \dot{q} + K^* q = F \quad (3)$$

[0090] 式中, M^* 为修正后的系统质量阵, C^* 为修正后的系统阻尼阵, K^* 为修正后的系统刚度阵。

[0091] 步骤 3, 根据步骤 2 的修正模型, 建立引入振动控制器后的可控模型;

[0092] 在钻杆上安装振动控制器, 根据步骤 2 中的修正模型式(3), 建立包括振动控制器的深孔加工刀具系统的可控模型:

$$[0093] \quad M^* \ddot{q} + C^* \dot{q} + K^* q + f = F \quad (4)$$

[0094] 式中, f 为振动控制器的输出力。

[0095] 步骤 4, 根据步骤 3 中的可控模型, 计算最优控制力及电流 I^* ;

[0096] 由式(4)可知, 刀具系统的最优控制运动方程为

$$[0097] \quad \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} + \mathbf{f} = 0 \quad (5)$$

[0098] 4.1) 可控模型的状态空间方程

[0099] 根据比例微分控制系统的原理, 控制向量为式(5)中的 $\mathbf{f}$, 并令状态变量 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_2 \quad \mathbf{X}_3 \quad \mathbf{X}_4]^T = [\mathbf{x} \quad \mathbf{y} \quad \dot{\mathbf{x}} \quad \dot{\mathbf{y}}]^T$, 则可控模型式(5)的状态空间方程即为:

$$[0100] \quad \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (6)$$

[0101] 式中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{E} \\ -\mathbf{M}^{*-1}\mathbf{K}^* & -\mathbf{M}^{*-1}\mathbf{C}^* \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{*-1} \end{bmatrix}$, $\mathbf{U} = \mathbf{f}$, $\mathbf{E}$ 为单位矩阵;

[0102] 4.2) 判断系统的可控性

[0103] 将状态空间方程式(6)中的 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 构成可控性矩阵 δ , 则 $\delta = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{N_1-1}\mathbf{B}]$, 其中 N_1 是状态方程的个数;

[0104] 若可控性矩阵 δ 的秩为 N_1 , 即矩阵 δ 满秩, 则该系统可控, 可以对该系统进行最优控制; 反之, 则该系统不可控, 无法对该系统进行最优控制;

[0105] 4.3) 最优反馈(最优控制力)的计算方法

[0106] 若经步骤 4.2) 判断该系统可控, 则引入最优控制性能指标 J ,

$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{L} \mathbf{U}) dt$, 其中 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{L}$ 分别是对状态变量和控制向量的加权矩阵。

[0107] 若令最优控制性能指标 J 取最小值, 则根据状态空间方程式(6)得到的 $\mathbf{U}(t)$ 即为最优反馈(即最优控制力), $\mathbf{U}(t) = -\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{X}(t)$,

[0108] 又因为有最优反馈矩阵 $\mathbf{K}_f = -\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}$, 其中 $\mathbf{P}$ 为黎卡提矩阵方程 $\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{L}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$ 的解,

[0109] 则可求得最优反馈 $\mathbf{U}$ 为

$$[0110] \quad \mathbf{U} = \mathbf{f} = \mathbf{K}_f \mathbf{X}(t) = -[\mathbf{K}_a \quad \mathbf{K}_b] \mathbf{X}(t) \quad (7)$$

[0111] 再将最优反馈 $\mathbf{U}$ 代入步骤 3 的可控模型式(4)中, 则得到最优反馈控制下的可控模型:

$$[0112] \quad \mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{C}^* - \mathbf{K}_b) \dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K}^* - \mathbf{K}_a) \mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (8)$$

[0113] 4.4) 计算最优控制电流值

[0114] 为了计算最优控制电流值, 必须构建控制力 $\mathbf{f}$ 与控制电流 $\mathbf{I}$ 的关系表达式。因此, 可用 Bing-ham 粘性模型将控制力描述为如下解析形式:

$$[0115] \quad \mathbf{f} = 2\pi(R^2 - r_0^2)\tau_y + \eta v \frac{\pi(R^2 - r_1^2)}{d_1} + \eta v \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{d_2} \quad (9)$$

[0116] 式(9)中, τ_y 是与磁场相关的剪切应力, η 为磁流变液粘性系数(即零磁场黏度), v 为活塞圆盘移动速度, R 为控制器圆盘 6 大径, r_0 为圆盘 6 中孔半径, r_1 为中心距凸块的距离, r_2 为环形活塞套半径, d_1 为凸块 14 与圆盘 6 之间的间隙, d_2 为凸块 14 厚度, 如图 2 所示。 τ_y 可依据所采用的磁流液体型号, 并结合 Mathematics 软件拟合得到磁场强度 H 与 τ_y 的关系表达式

$$[0117] \quad \tau_y = \alpha_1 H^3 - \alpha_2 H^2 + \alpha_3 H - \alpha_4 \quad (10)$$

[0118] 式(10)中, α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 均为常值系数。

[0119] 此外,由安培环路定理知,磁场强度可表示为

$$[0120] \quad H = \frac{NI}{S\mu_0\mu_f R_m} \quad (11)$$

[0121] 式(11)中, N 为线圈匝数, I 为输入电流, S 为磁路截面积, μ_0 为真空磁导率, μ_f 为磁流液体相对磁导率, R_m 为磁路总磁阻。

[0122] 结合以上(9)、(10)和(11)式,即可建立电流与控制力关系式

$$[0123] \quad f = \beta_1 I^3 - \beta_2 I^2 + \beta_3 I + \beta_4 v - \beta_5 \quad (12)$$

[0124] 其中, I 为输入振动控制器的控制电流值; β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 均为常值系数。

[0125] 依据步骤 4.3) 中公式(7),可求得最优反馈 U (即最优控制力, $U=f$),并将其代入公式(12),即可求得最优控制电流 I^* 。

[0126] 步骤 5,将经步骤 4 计算出的最优控制电流值 I^* 输入到振动控制器的线圈 7 中,由于线圈 7 的周围会产生磁场,使得振动控制器中的磁流变液体 8 在磁场的作用下,使其对刀杆 13 的阻尼产生变化,由于是通过最优控制方法求得的最优控制电流值 I^* ,所以该电流值 I^* 的输入可以使得刀杆 13 振动产生的振幅最小,加工出的深孔的粗糙度和圆度误差值都会最小,即使得深孔加工刀具系统实现了最优振动状态。

[0127] 实施例

[0128] 步骤 1,由刀具、刀杆、导套和辅助支撑构成深孔加工刀具系统,具体参数为:刀杆长度 $l=1.2\text{m}$,外径为 17mm ,内径为 14mm ,材料为高强度合金钢,密度为 $7.87 \times 10^3 \text{kg/m}^3$;供油压力 $p_{in}=2 \times 10^6 \text{Pa}$,切削液动力粘度 $\mu=0.026 \text{Pa} \cdot \text{s}$,钻杆在水平方向和竖直方向上的偏心量 $e_x=e_y=5 \mu\text{m}$;工件材质为 45 号钢,长度 400mm ,加工深度为 100mm 。

[0129] 根据铁摩辛柯梁理论和以上的参数值,计算出系统质量阵 M 、系统阻尼阵 C 、系统刚度阵 K 矩阵通过拉格朗日 (Lagrange) 方程组导出该深孔加工刀具系统的理论计算模型:

$$[0130] \quad M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F \quad (13)$$

$$[0131] \quad M = \begin{bmatrix} 0.0512 & 0 & 0.0017 & 0 & 0.0178 & 0 & -0.0010 & 0 \\ 0 & 0.0512 & 0 & 0.0017 & 0 & 0.0178 & 0 & -0.0010 \\ 0.0017 & 0 & 0.0001 & 0 & 0.0010 & 0 & -0.0001 & 0 \\ 0 & 0.0017 & 0 & 0.0001 & 0 & 0.0010 & 0 & -0.0001 \\ 0.0178 & 0 & 0.0010 & 0 & 0.0512 & 0 & -0.0017 & 0 \\ 0 & 0.0178 & 0 & 0.0010 & 0 & 0.0512 & 0 & -0.0017 \\ -0.0010 & 0 & -0.0001 & 0 & -0.0017 & 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & -0.0010 & 0 & -0.0001 & 0 & -0.0017 & 0 & 0.0001 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 [0132] \quad K &= 1.0 \times 10^5 \begin{bmatrix} 3.8917 & 0 & 0.4670 & 0 & -3.8917 & 0 & 0.4670 & 0 \\ 0 & 3.8917 & 0 & 0.4670 & 0 & -3.8917 & 0 & 0.4670 \\ 0.4670 & 0 & 0.0750 & 0 & -0.4670 & 0 & 0.0370 & 0 \\ 0 & 0.4670 & 0 & 0.0750 & 0 & -0.4670 & 0 & 0.0370 \\ -3.8917 & 0 & -0.4670 & 0 & 3.8917 & 0 & -0.4670 & 0 \\ 0 & -3.8917 & 0 & -0.4670 & 0 & 3.8917 & 0 & -0.4670 \\ 0.4670 & 0 & 0.0370 & 0 & -0.4670 & 0 & 0.0750 & 0 \\ 0 & 0.4670 & 0 & 0.0370 & 0 & -0.4670 & 0 & 0.0750 \end{bmatrix} \\
 [0133] \quad C &= 2n \times 1.0 \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 0 & 0.8418 & 0 & 0.0154 & 0 & -0.8418 & 0 & 0.0154 \\ -0.8418 & 0 & -0.0154 & 0 & 0.8418 & 0 & -0.0154 & 0 \\ 0 & 0.0154 & 0 & 0.0055 & 0 & -0.0154 & 0 & -0.0015 \\ -0.0154 & 0 & -0.0055 & 0 & 0.0154 & 0 & 0.0015 & 0 \\ 0 & -0.8418 & 0 & -0.0154 & 0 & 0.8418 & 0 & -0.0154 \\ 0.8418 & 0 & 0.0154 & 0 & -0.8418 & 0 & 0.0154 & 0 \\ 0 & 0.0154 & 0 & -0.0015 & 0 & -0.0154 & 0 & 0.0055 \\ -0.0154 & 0 & 0.0015 & 0 & 0.0154 & 0 & -0.0055 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[0134] 式中, n 为主轴转速。

[0135] 步骤 2, 根据式 (13), 当加工进给量为 0.024mm/r 、切削力波动 f_{c0} 数值为 0.04KN 及工件转速为 560r/min 时, 则被加工孔的圆度误差的理论值为 $2.35\mu\text{m}$;

[0136] 同样的加工参数条件下, 通过预先固定在刀杆上, 距离刀具 330mm 处的位移传感器及美国 DEWESOFT 采集仪来获取刀具的实际振动信息, 采集仪的采样频率为 1000Hz , 被加工孔的圆度误差用 Mitutoyo 圆度仪进行测量, 则得到刀具所加工深孔的圆度误差实际值为 $2.46\mu\text{m}$, 理论值与实际值的误差小于理论值的 5% , 则说明建立的理论计算模型 (13) 是合理的。

[0137] 步骤 3, 在刀杆上安装振动控制器, 振动控制器的具体参数为: 主动控制器外径为 244mm , 宽度为 45mm , 磁流变液体选用美国 Lord 公司生产的 MRF-132DG, 放置于刀杆上距刀头 600mm 位置处。

[0138] 根据步骤 1 中的理论计算模型 (13) 和振动控制器的具体参数, 则建立包括振动控制器的深孔加工刀具系统的可控模型。通过步骤 2 的实验验证, 理论模型与实验结果的误差小于理论值的 5% , 故公式 (13) 中 M 、 C 、 K 无需修正, 即 $M=M^*$ 、 $C=C^*$ 、 $K=K^*$ 。因此, 包括振动控制器的深孔加工刀具系统的可控模型为

$$[0139] \quad M^* \ddot{q} + C^* \dot{q} + K^* q + f = F \quad (14)$$

[0140] 步骤 4, 根据步骤 3 中的可控模型, 将其转化为状态空间方程, 并依据步骤 4.2) 得到系统可控。通过引入最优控制性能指标 $J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (X^T Q X + U^T L U) dt$, 则可求得最优反馈 U 为 (即最优控制力)

$$[0141] \quad U = K_f X(t) = -[K_a \ K_b] X(t) \quad (15)$$

[0142] 其中

$$\begin{aligned}
 [0143] \quad K_a &= 1.0 \times 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.0928 & & & & & & \\ & -0.3248 & & & & & \\ & & -0.1154 & & & & \\ & & & 0.3645 & & & \\ & & & & 0.0650 & & \\ & & & & & -0.2450 & \\ & & & & & & -0.0861 \\ & & & & & & & 0.2723 \end{bmatrix} \\
 [0144] \quad K_b &= 1.0 \times 10^3 \times \begin{bmatrix} & -0.0032 & & & & & \\ & & -0.0032 & & & & \\ & & & -0.0032 & & & \\ & & & & -0.0035 & & \\ & & & & & -0.0038 & \\ & & & & & & -0.0037 \\ & & & & & & & -0.0038 \\ & & & & & & & & -0.0040 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[0145] 然后,构建控制力 f 与控制电流 I 的关系表达式:

[0146] 由于振动控制器基本尺寸为 $R=88\text{mm}$, $r_0=27\text{mm}$, $r_1=43\text{mm}$, $r_2=26.5\text{mm}$, $d_1=1\text{mm}$, $d_2=10\text{mm}$, 将这些尺寸参数带入公式(14)和(15),可得

$$[0147] \quad f = 0.0441 \tau_y + 62.3039v \quad (16)$$

[0148] 实验中,振动控制器磁流变液材料选择 Lord 公司生产的 MRF-132DG, MR 流体剪应力与磁场强度的近似关系曲线方程为:

$$[0149] \quad \tau_y = 4 \times 10^{-7} H^3 - 0.00081 H^2 + 0.3483 H - 0.6631 \quad (17)$$

[0150] 由公式(11),并结合实际设计参数:线圈匝数 $N=310$, 控制器磁路截面积 $S=0.022\text{m}^2$, $\mu_f=5.9$, $R_m=2.98 \times 10^4 \text{H}^{-1}$, 真空磁导率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$, 磁场强度为

$$[0151] \quad H = 6.38 \times 10^4 I$$

[0152] 结合(9)、(10)和(11)式及以上计算结果,即可建立电流与控制力关系式

$$[0153] \quad f = 0.0043 I^3 - 0.1399 I^2 + 0.9603 I + 62.3039v - 0.0292 \quad (18)$$

[0154] 依据上式,可求得在最优反馈 U 条件下,最优控制电流 $I^*=0.8531\text{A}$ 。然后,将最优控制电流值 $I^*=0.8531\text{A}$ 输入到振动控制器的线圈 7 中,使得深孔加工刀具系统实现了最优振动状态。

[0155] 将不同的电流输入到振动控制器中,测量出刀具加工出的孔的圆度误差值见表 1:

[0156] 表 1 实验结果对比

[0157]

刀具转速(r/min)	电流 (A)	圆度误差 (μm)	粗糙度 (μm)
560	0	2.46	2.25

560	0.8	1.78	1.19
560	1.21	2.27	1.36
560	1.55	2.35	1.75

[0158] 通过表 1 的比较可以看出,当振动控制器的输入电流为 0.8A 时,圆度误差和粗糙度数值最小,说明本方法求得的最优控制电流值 $I^*=0.8531\text{A}$,使得深孔加工刀具系统实现了最优振动状态。

[0159] 与现有的国内外方法相比,本发明的最优控制方法为首次提出,它与本发明所提出的结构相结合,能够精确地控制刀具的运行状态,实现孔加工精度的目标控制,从而确保最优的钻杆振动控制效果和最佳的深孔加工品质。此外,实验结果也表明所提出的振动控制器结构设计方案可行,本发明将为探索深孔加工钻杆系统的振动抑制和提升深孔的钻削精度奠定基础。

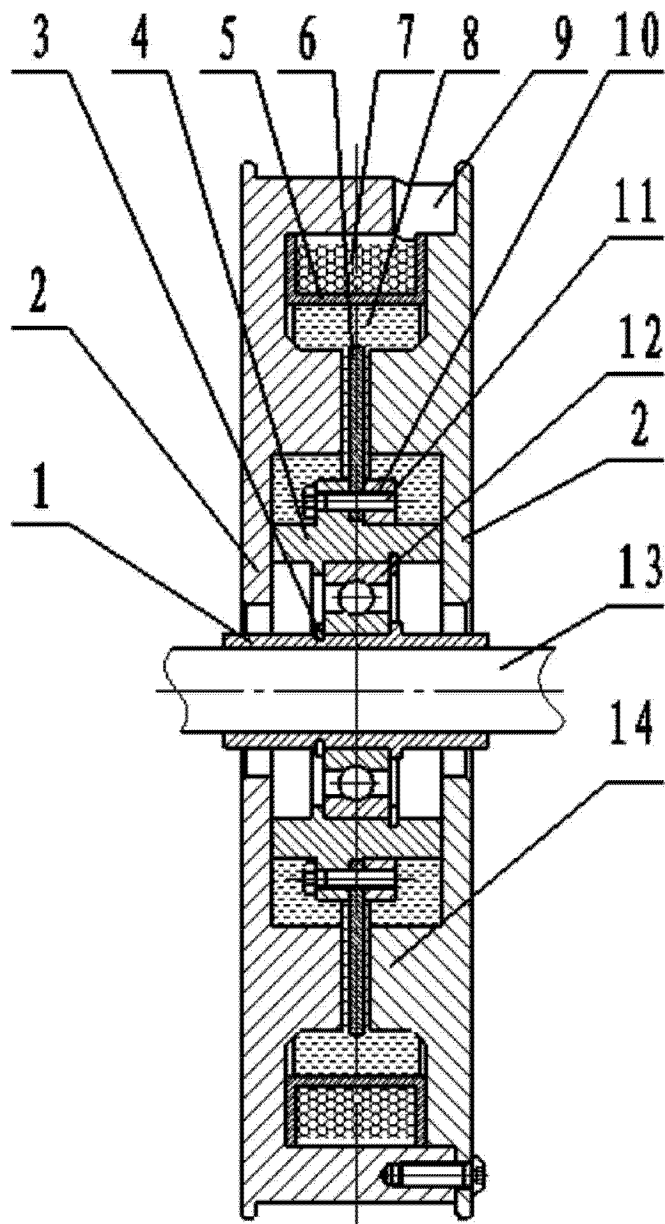


图 1

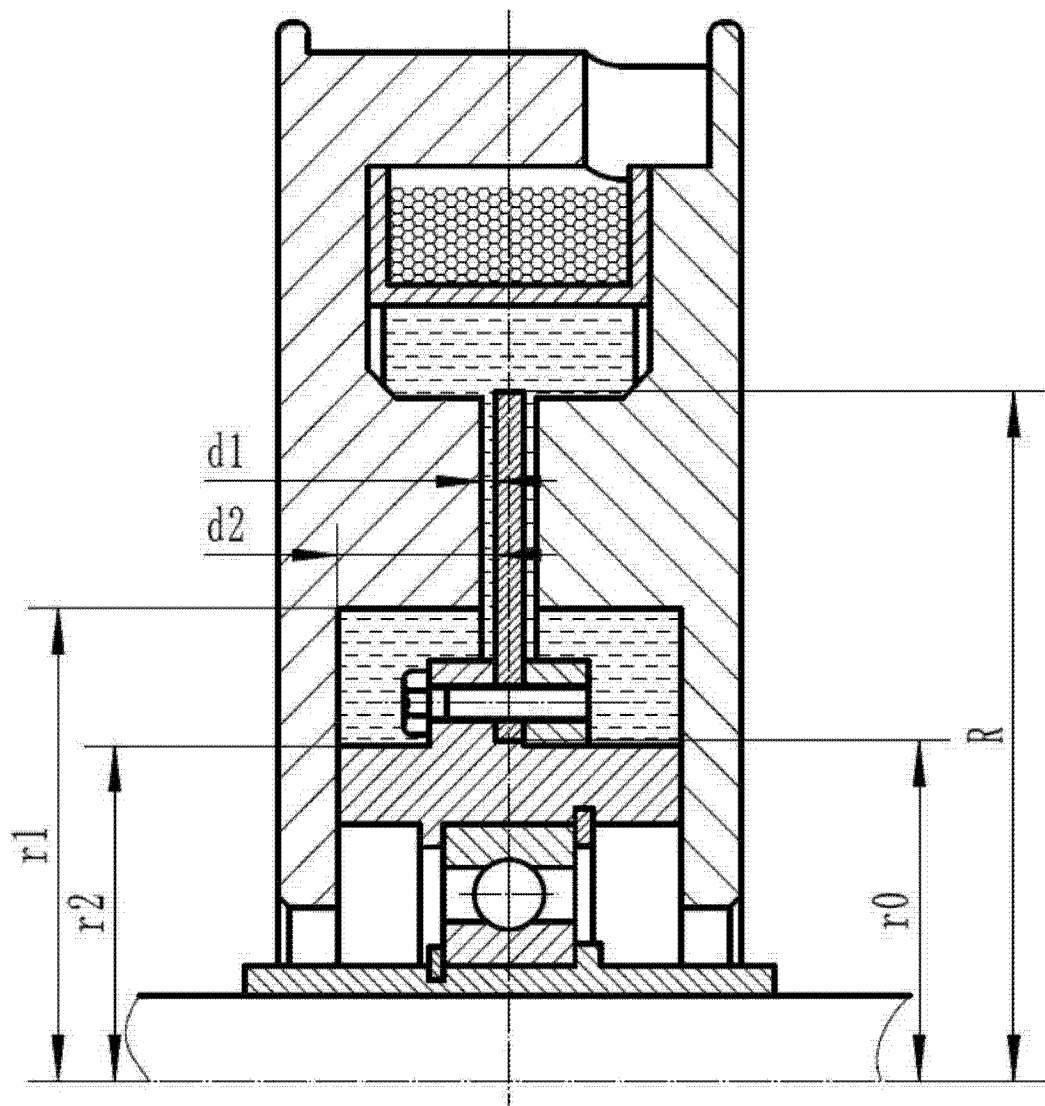


图 2