

# 四轴球体研磨机实现球体均匀研磨的充分必要条件\*

孙新民

(河北理工学院机械系 唐山 063009)

李树文 王永梁

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

**摘要** 根据四轴球体研磨机的球体研磨原理,由实现球体均匀研磨所需的压力和速度条件,对该机的结构参数和运动参数进行了解析和图解分析,建立了实现球体均匀研磨的充分必要条件。

**关键词** 球体研磨 研磨压力 研磨速度

## 1 引言

四轴球体研磨机是球体超精密加工的最佳手段之一。文献[1, 2]介绍了它的工作原理、结构布置、实现四轴正反转向的控制及研磨直径  $\Phi 38\text{mm}$  石英实心球体所能达到的圆度。但据笔者所知,迄今为止关于该机的结构参数和运动参数与球体均匀研磨间的关系论证尚很缺乏,亟待补充和完善。为此,本文根据四轴球体研磨机的球体研磨原理,按照实现球体均匀研磨所需研磨压力和速度的条件,对研磨状态下球体的受力和运动作了解析与图解分析,导出了该机的结构参数和运动参数应满足的条件。

## 2 研磨球体的受力分析

图1所示为四轴球体研磨机的研磨原理图。图中, , , 轴在空间相互对称布置,且任意二轴间的夹角为  $\Phi$ ,四轴线汇交于球心  $o$ 。设图中 轴垂直布置, , 轴与水平面呈

\* 国防科工委九五预研项目子课题:小型静电陀螺仪转子研磨工艺及设备研究

收稿日期:1998-03-30

修稿日期:1998-09-02

$\beta$  角布置, 它们在水平面投影后相互夹角为  $\Psi$ , 四轴前端分别装有圆筒式研具, 把被研磨球体包容在中间。研磨时四研具绕各自轴线以角速度  $\omega_i (i = 1, 2, 3, 4)$  旋转, 并借助研具对球体压力产生的摩擦力驱动被研球体绕转动轴  $W$  以角速度  $\bar{\omega}$  旋转, 通过有序改变四轴正反转向组合使球体转动轴位置方向变化, 从而可研磨出整个球面。

球面研磨是依靠研具与被研球体间的游离磨料、压力和相对运动来实现的。所以磨料粒度和相对运动一定的条件下, 要达到对球体的均匀研磨, 还需研具对球体的压力相等。

设四研具对球体的集中压力值为  $P_i = P (i = 1, 2, 3, 4)$ , 对球体的摩擦驱动力矩为  $\bar{M}_i (i = 1, 2, 3, 4)$ , 四压力与各自轴线同轴, 并指向球心。若不计球体质量(球体重量与压力相比可忽略不计), 则球体的受力状况如图 2 所示。又若球体的诸力的作用下处于平衡状态, 则由图 2 所示的几何关系可写出它的力平衡方程式:

$$\left. \begin{aligned} Z &= 3P \sin \beta - P = 0 \\ Y &= 2P \cos \beta \cos \Psi - P \cos \beta = 0 \\ \bar{M}_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

解上述方程式并考虑  $\Phi = \pi/2 + \beta$  的关系, 则可得四研具对球体压力值相等应满足的几何条件:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= 19.4712^\circ \\ \Psi &= 109.4712^\circ \\ \Phi &= 120^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

### 3 研磨球体的运动分析

由均匀研磨的作用机制知, 要实现均匀研磨, 除保证四研具球体的压力值相等和满足式 (2) 外, 还应保证研具与球体接触(理论上为一圆)间的相对速度值(研磨速度)相等。

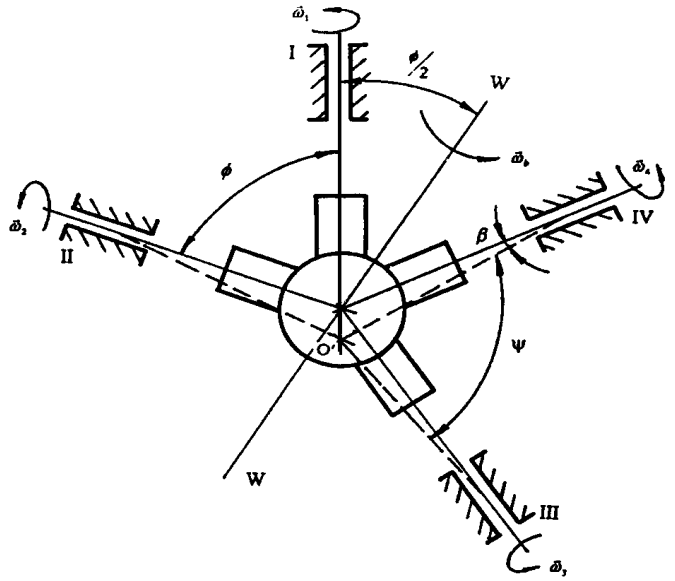


Fig. 1 The sketch of ball lapping

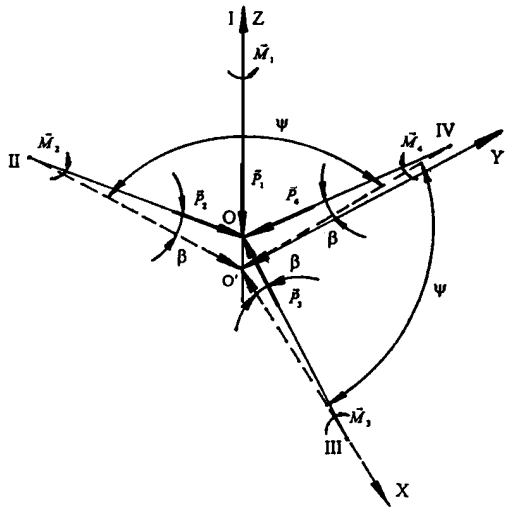


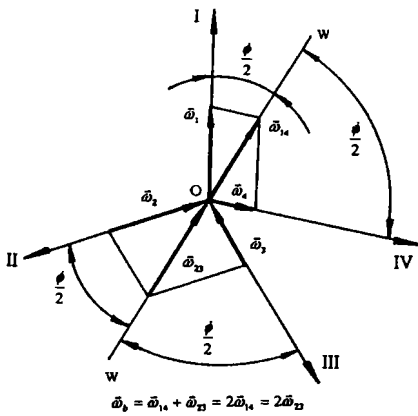
Fig. 2 Free-body diagram of ball lapping

设研具无滑动的驱动球体, 研具的角速度为  $\vec{\omega}$ , 且  $\omega = \alpha (i = 1, 2, 3, 4)$ , 研具半径为  $r_i$ , 且  $r_i = r (i = 1, 2, 3, 4)$ , 球体的角速度为  $\vec{\omega}$ 。若能研磨出球面, 球体的角速度应满足下式:

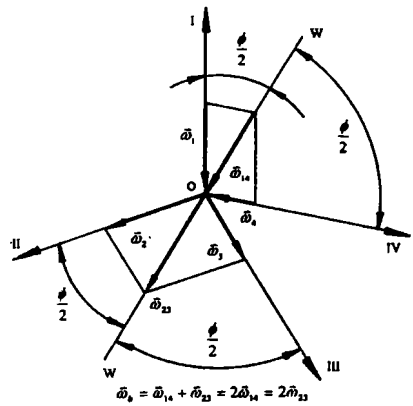
$$\left. \begin{aligned} \vec{\omega} &= \vec{\omega} \quad 0 \\ \vec{\omega} &= \vec{\omega} \quad k\vec{\omega} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $k$  为比例系数。

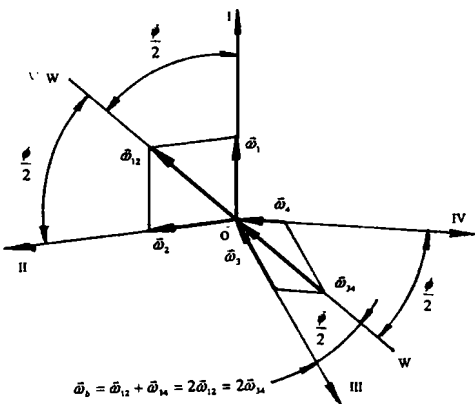
由文献[1, 2] 知, 能满足式(3) 的  $\vec{\omega} (i = 1, 2, 3, 4)$  正反转向组合共有 6 种, 即二轴正向二轴反向的 6 种组合。根据式(2) 给出的几种条件及  $\omega = \alpha (i = 1, 2, 3, 4)$ , 按式(3) 可做出球体角速度  $\vec{\omega}$  的图解, 如图 3 所示。从图中的几何关系可解得:



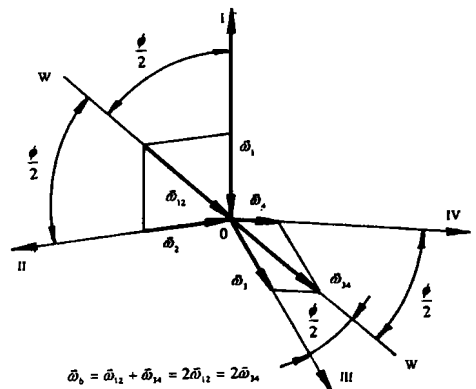
(a)



(b)



(c)



(d)

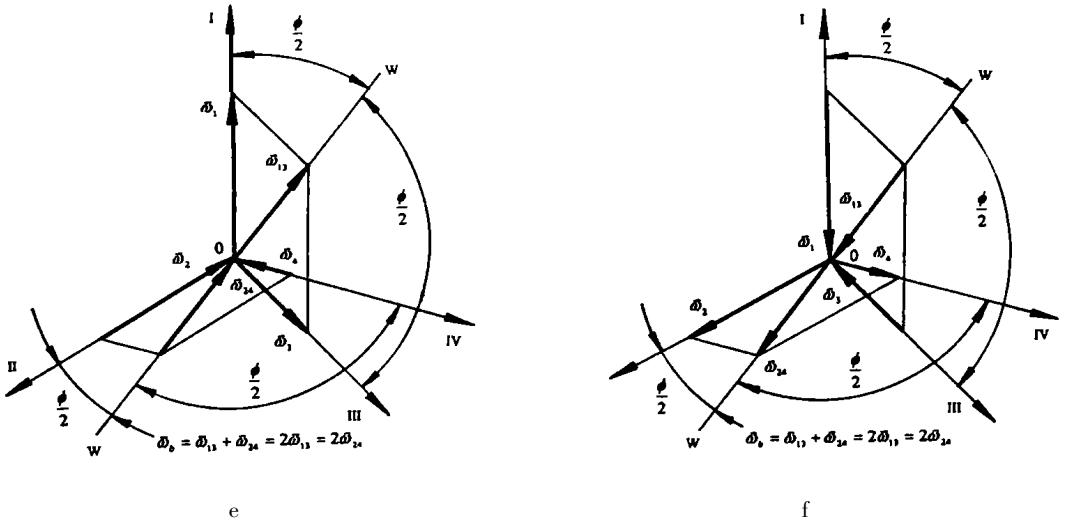


Fig. 3 Graphical velocity determination

$$\omega_i = 2\omega \frac{1}{2(1 - \cos \Phi)} \quad \vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_i = \Phi/2 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

同理, 设研具的线速度  $\vec{V}_c$ , 用  $V_c = \omega R$ , 球体的线速度为  $\vec{V}_b$ , 且  $V_b = \omega R$ , 由  $\vec{V}_c$  和  $\vec{V}_b$  方向间的几何关系, 可导出研具与球体间相对速度值  $V_{bc}$  的计算公式:

$$V_{bc} = \sqrt{V_c^2 + V_b^2 - 2V_c V_b \cos(\Phi/2)} \quad (5)$$

从上述公式推导过程不难得知, 保证四研具对球体研磨速度相等的条件为:

$$r_i = r; \omega_i = \omega \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

### 4 均匀研磨的充分必要条件

根据上述受力分析和运动分析, 可归纳出四轴球体研磨机的实现球体均匀研磨的充分必要条件为:

$$\beta = 19.4712^\circ; \Phi = 109.4712^\circ; \Psi = 120^\circ; \omega_i = \omega; r_i = r \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

及二研具正向二研具反向组合变化, 如图 4 所示。

应当指出, 式(9)中的结构参数和运动数据是忽略了球体重量对研磨压力的影响以及研具摩擦驱动球体存在相对滑

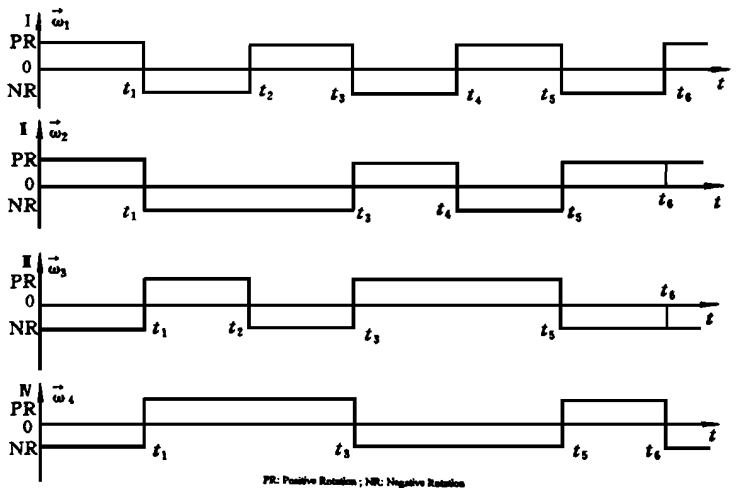


Fig. 4 The six rotation combination of four lap tools

动对球体角速度的影响而导出的,因此按此条件设计的四轴球体研磨机仅能近似实现对球体的均匀研磨。

## 5 结 论

文中归纳的四轴球体研磨机的结构参数、运动参数、研具正反转向组合变化线图、研磨速度和球体角速度计算一般公式可作为设计依据,也可作为球体研磨工艺研究的参考。

### 参 考 文 献

- 1 Anglele W. Finishing High precision quartz ball. Precision Engineering, 1980, (3): 119 ~ 122
- 2 王先逵编著. 机械制造工艺学(下册). 北京:清华大学出版社, 1989

## Full Conditions of the Uniform Lap for the Four Shafts Ball-lapping Machine

XUN Xin-Min

(Department of Mechanical Engineering, Hebei Institute of Technology, Tangshan 063009)

LI Shu-Wen, WANG Yong-Liang

(Department of Precision Instrument and Mechanisms, Tsing Hua University, Beijing 100008)

### Abstract

This paper describes the structure and kinematic parameters for the uniform lapping of the four shafts ball-lapping machine using analytical and graphical methods, and establishes full conditions of the uniform lapping on requiring equal pressure and velocity of four lap tools.

**Key words:** Ball-lapping, Lapping pressure, Lapping velocity

孙新民 男, 46岁, 河北理工学院机械系副教授。多年从事机械设计与制造教学的与科研工作, 负责研制的“数控混凝土空心板自动切割机”通过省级鉴定。近年来共发表论文 20 余篇。1996 年至今与清华大学精密系合作承担国防科工委 1995 预研项目子课题“小型静电陀螺仪转子工艺及设备的研究”工作。