

三轴差速式管道机器人越障能力分析

殷奇会, 孔凡让*

(中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230006)

摘要: 为提高三轴差速式管道机器人在恶劣管道工作环境中的生存能力, 提出了一种提高且能计算出管道机器人越障能力的方法。根据轮式管道机器人通过性的具体要求, 依据三轴差速理论, 建立了越障条件下的管道机器人力学模型, 并得到了其约束条件, 通过采用全局寻优算法得出了其主要参数最优解, 进而得到了管道机器人所能克服的台阶最大高度数值, 即越障能力; 通过力学分析, 得出了三组支撑杆组越障能力相同, 即其越障能力具有同一性和对称性。研究结果表明, 该方法验证了三轴差速理论的正确性, 通过该方法优化后的管道机器人结构参数为以后管道机器人的设计提供了有效的技术数据。

关键词: 三轴差速式管道机器人; 三轴差速理论; 越障能力分析; 力学分析

中图分类号: TP242.4; TH112 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1371-05

Crossing ability analysis of triaxial differential pipeline robot

YIN Qi-hui, KONG Fan-rang

(School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230006, China)

Abstract: In order to improve the viability of three-axis differential wheeled pipeline robot in the harsh pipeline environment, a method applied to raise and calculate pipe robot crossing ability was supplied. According to wheel pipe robot specific requirements, a robot mechanical model and its constraints were established under a crossing situation based on three-axis differential theory. A global optimization algorithm was taken to draw the main parameters of the optimal solution, and to get maximum height value of pipeline robot to be able to overcome the steps that crossing ability. It was gotten that the crossing ability of three supporting groups has identity and symmetry through mechanical analysis. The results indicate that the method verifies the correctness of the triaxial differential, the robot structure parameters of the optimized pipeline via the method provide an effective technical parameters for the future pipeline robot design.

Key words: triaxial differential pipeline robot; three-axis differential speed theory; crossing ability analysis; mechanical analysis

0 引言

管道机器人是一种在管道内部行走, 并能携带多种传感器和操作机械的机器装置。它接收外界的主动控制或运行预先编好的程序, 能够进行一系列管道作业, 广泛应用于石油、化工、核工业、城建行业等工程管道的质量检测、探伤、故障诊断、焊接、管道维护、清洁等领域。

从管道机器人的出现至今, 研究人员从未间断过对它研究, 陆续研制出了采用轮式、履带式、腿足式、步进式、蠕动式和蛇行式等驱动方式的管道机器人^[1]。而对于大中型油气输送管线作业机器人来说,

研究者多数采用全主动轮式驱动方式, 这种驱动方式在直管中驱动效率高, 牵引力充足稳定。但当机器人通过弯管时, 由于各轮轮心曲率半径不同, 使得某些驱动轮成了事实上的制动轮, 这样不但降低了驱动力, 而且因驱动轮间产生的寄生功率循环而加剧了载体内部的功耗和驱动部件的快速磨损。因此, 国内外学者展开了对差动式管道机器人的研究^[2-5], 提出了单电机输入、具有三轴差速功能的机械自适应装置—三轴差速器, 从而构建了三轴差速理论。

三轴差速理论能很好地解决机器人在过弯道时遇到的功耗问题, 但还有更重要的问题尚未解决。由于管道机器人要独立地在管道中工作, 工作环境恶

收稿日期: 2012-07-04

作者简介: 殷奇会(1988-), 男, 安徽枞阳人, 主要从事机器人和设备故障诊断方面的研究。E-mail: qhyin@mail.ustc.edu.cn

通信联系人: 孔凡让, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: kongfr@ustc.edu.cn

劣:管道空间狭窄,长时间的输送将造成管道内壁湿滑,管道内壁腐蚀^[6]形成凹坑、凸起等不规则地形,以及管径变化造成的台阶、管道损坏造成的沟槽等等。研究三轴差速式管道机器人越障性能很有必要,可切实提高管道机器人在恶劣的管道工作环境中的生存能力,这也是保证机器人能正常工作的基本前提。

本研究通过建立遇到障碍的机器人的力学模型,并以寻优的方法得到机器人主要参数的最优解,优化机构设计,可为机器人的设计提供有效的参数支持。

1 三轴差速理论

三轴差速轮系是一个3自由度的机构,由分布在空间的4个圆锥齿轮差速器按一定关系组合而成,其结构原理简图如图1所示。

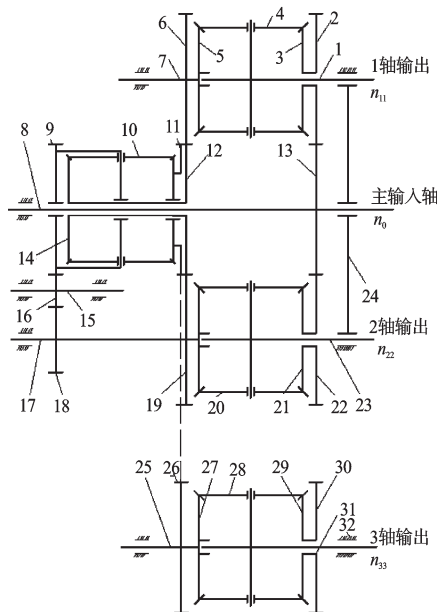


图1 三轴差速轮系运动简图

该轮系由4个部分组成:如图1右侧部分所示,构件1~构件7组成主差速器1,构件19~构件23组成主差速器2,构件25~构件31组成主差速器3,构件6~构件11组成了分动器。3个主差速器在空间上均匀地分布。在主输入轴11的周围,整体结构在空间上完全对称。各锥形齿轮参数相同。主运动由轴11输入,转速为 n_0 ,在差速器中, n_i 为齿轮 i 的转速, Z_i 为齿轮 i 的齿数。由于轮系整体结构在空间上要求完全对称,故使 $Z_6/Z_{11}=2Z_{18}/Z_9=Z_{26}/Z_{11}$ 。三轴差速轮系的运动关系方程式为:

$$n_{11} + n_{22} + n_{33} = -3Z_{13}N_0/(2Z_2) \quad (1)$$

从式(1)中可知三轴差速轮系特性,差速器的速度反馈权值等同,即各输出轴的输出转速 n_{11} 、 n_{22} 、 n_{33} 和总输入转速 n_0 的相对运动关系是平等的^[7]。在结构上对称的差速轮系中,差速器的总输入与各分输出

之间的数值关系由初级传动比确定。

2 越障能力分析

管道机器人属于特种机器人,其工作环境非常恶劣:管道空间狭窄,长时间的输送造成管道内壁湿滑,因管道内壁腐蚀形成凹坑、凸起,以及管径变化造成的台阶、管道损坏造成的沟槽等等。针对管道空间狭窄和管道内壁湿滑的情况,研究者可以采用减小机器人尺寸和增大车轮摩擦系数的方法。针对后面几种对管道机器人生存威胁较大的情况,本研究通过力学分析^[8],以给出相应的理论依据,并设定管道直径 d 为310 mm。

2.1 6×3后轮驱动管道机器人越台能力

管道机器人在结构上是完全对称的,3个支撑腿在沿圆周方向上均匀分布, β 为管道下半部分最靠近竖直线 $t-t$ 的驱动轮伸展臂方向与竖直线 $t-t$ 之间的夹角为机器人作业姿态角^[9]。管道机器人在管道中纵面受力图如图2所示。将机器人主体看成质点 O ,受到自身重力 G ,和支撑腿 a 、 b 、 c 上弹簧的压紧力 F_{sa} 、 F_{sb} 、 F_{sc} 。

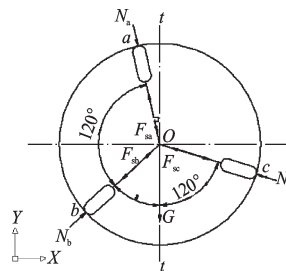


图2 管道机器人在管道中纵面受力图

由力的平衡可知:

$$F_{sa} \times \cos(60^\circ - \beta) + G = F_{sb} \times \sin(90^\circ - \beta) + F_{sc} \times \cos(120^\circ - \beta) \quad (2)$$

解得:

$$F_{sb} = [F_{sa} \times \cos(60^\circ - \beta) + G - F_{sc} \times \cos(120^\circ - \beta)] / \cos \beta$$

2.2 支撑杆组b碰到台阶

2.2.1 支撑杆b组前轮碰到台阶

由于管道机器人在跨越台阶时速度很小,本研究采用静力学分析其受力情况(受力图如图3所示)。其中, O 点为机器人重心,杆 O_1O_2 为机器人支架,前轮 O_1 为从动轮,后轮 O_2 为驱动轮。管道机器人前轮(从动轮)碰到台阶的情形如图3(a)所示,分别由 xy 方向力平衡可知:

$$\begin{cases} F_1 \cos \alpha + f_1 \sin \alpha - f_2 = 0 \\ F_1 \sin \alpha - f_1 \cos \alpha + f_2 - F_{sb} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对点 O_1 ,由力矩平衡:

$$f_1 \frac{D}{2} + F_2 L - f_2 \frac{D}{2} - F_{sb} \alpha = 0 \quad (4)$$

$$f_1 = f F_1 \quad (5)$$

$$f_2 = \mu F_2 \quad (6)$$

式中: F_1 —台阶对前轮的反作用力, f_1 —前轮受到的滚动阻力, f —滚动阻力系数, F_2 —后轮受到管壁的反作用力, f_2 —驱动轮受到的摩擦力, μ —滑动摩擦系数, F_{sb} —轮 b 受到重力和压紧力的合力, D —轮子直径, α —滚动阻力与竖直方向的夹角。

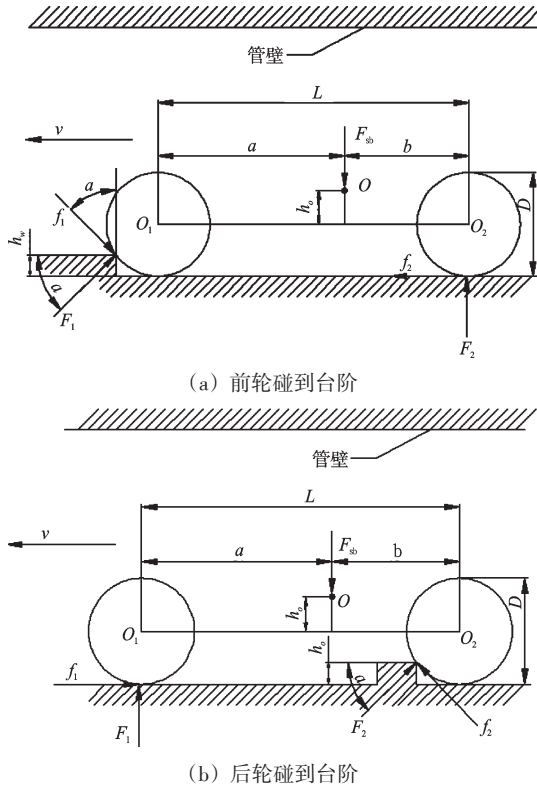


图3 6×3管道机器人通过台阶时的受力图

将公式(3~6)联立,消去 F_{sb} 、 F_1 、 F_2 ,得:

$$(\mu a + f a - f L + \frac{D}{2} \mu f) \sin \alpha + (a - a f \mu - L + \frac{D}{2} \mu) \cos \alpha = f \mu \frac{D}{2} \quad (7)$$

由图3中几何关系知:

$$\sin \alpha = \frac{0.5D - h_w}{0.5D} = 1 - \frac{h_w}{2D} \quad (8)$$

代入式(7)中,由于机器人各轮外部采用硬质耐磨橡胶材料,故可设滚动阻力系数 $f \approx 0$,可求得:

$$\frac{h_w}{D} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2 \left[\frac{a/L}{1 - (a/L) - \frac{1}{2} \mu D/L} \right]}} \right\} \quad (9)$$

式中: h_w/D —管道机器人前轮单位车轮直径可克服的台阶高度,反映了其前轮越障的能力。

由上式(9)可知, h_w/D 与 μ 、 a/L 、 D/L 有关。

现将利用 Matlab 软件全局寻优过程介绍如下:

变量参数: μ 、 a/L 、 D/L

目标函数:式(9)

约束条件:

$$\begin{cases} 0 < a < L \\ 0 < \mu < 1 \\ D_1 < 155 \\ 310 < L \leq 2\sqrt{310^2 - d^2} \leq 2\sqrt{(D_1/2 + R)^2 - (R - D_1/2 + d)^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: R —管道在弯道处的半径, D_1 —管道直径。

且:

$$\{(R + D_1/2) \sin 45^\circ - (R - D_1/2)\} < d < D_1$$

由式(9)可知, μ 与 h_w/D 成正比,分析时,取 μ 的最大值,令 $\mu=1$ 。本研究在弯道半径为 155 mm 的管道中进行分析:

(1) 要取得式(9)的最大值,只要求得 $1/2\sqrt{1 + a/L(1 - a/L - 0.5D/L)}$ 的最小值即可;

(2) 令 $a=x_1$, $D=x_2$, $L=x_3$,则:

$$f_{\min} = \frac{1}{2\sqrt{1 + \frac{x_1/x_3}{1 - x_1/x_3 - 0.5x_2/x_3}}} \quad (11)$$

(3) 变量参数为 x_1 , x_2 , x_3 ;

(4) 由式(5)和式(10)可知约束条件为:

$$\begin{cases} 310 < x_3 < 436.8 \\ 0 < x_2 < 155 \\ 0 < x_1 < x_3 \end{cases} \quad (12)$$

(5) 利用 Matlab 优化工具箱,使用 fmincon 函数。作出目标函数的函数图象,确定起始点 x_0 的近似大小。

(6) 由式(12),令 $x_3=420$ mm,代入式(11),画出它的三维图像。

(7) 函数图形如图4所示。由图4可确定 x_0 的大概位置是(382,74,420)。设计时,驱动轮采用钢骨架外衬耐磨橡胶,一般的石油管道是 16Mn 钢,钢与橡胶的摩擦系数约为 0.75^[10],故 μ 取 0.75。

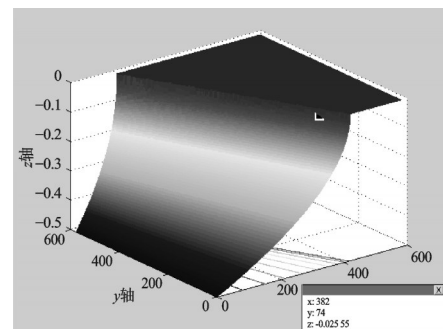


图4 函数图形

(8) 由 fmincon 函数计算出局部最小值及相应 x 值 x_1 ,再利用 x_1 循环迭代,最终得到满意的最小值。

经过对 x 的4次迭代, fmincon 函数参数“maxiter”在第一次迭代中设为20, $x_1=(384.76, 75.10, 417.55)$, $f_{\text{val}}=0.07$; 第2次迭代中设为5, $x_2=(385.55, 75.40, 416.79)$, $f_{\text{val}}=0.058$; 第3次迭代中设为5, $x_3=(386.68, 75.83, 415.70)$, $f_{\text{val}}=0.029$ 第4次迭代中设为1。得到 $x_4=(386.70, 75.84, 415.68)$, $f_{\text{val}}=0.024$ 。由于 x_4 的值和 x_3 的值非常接近, f 的值也非常接近, 达到了收敛精度(精度为百分位), 停止迭代。

(9) 上述理论值的精度为0.01 mm, 在实际加工中, 为减小生产成本和制造难度, 将精度下调为1 mm, 故最终 x 为(387, 76, 416)。

(10) h_w/D 在可行的加工精度内, 摩擦系数 $\mu=0.75$ 的情况下, h_w/D 最大值为0.476。优化后, $a=384$ mm, $D=76$ mm, $L=416$ mm, $\mu=0.75$, 优化尺寸后的管道机器人的越台能力 $h_w/D=0.476$ 。故该尺寸的管道机器人在管道直径为310 mm, 弯道直径为200 mm中能跨越最高的台阶 $h_w=36.176$ mm ≈ 36 mm。可越过的高度将近是轮子直径的一半。

2.2.2 后轮碰到台阶

支撑杆b组后轮碰到台阶时受力情况如图3(b)所示。分析可知:

$$\begin{cases} F_1 + F_2 \sin \alpha - F_{\text{sb}} + f_2 \cos \alpha = 0 \\ f_1 - f_2 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha = 0 \\ f_1 D/2 + F_2 \cos \alpha D/2 - b F_{\text{sb}} - f_2 D/2 = 0 \\ f_1 = \mu F_1 \\ f_2 = F_2 \cdot f \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)解得:

$$\frac{h_w}{D} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \right] \quad (14)$$

式(14)表示后驱动轮单位轮直接可克服的台阶高, 即管道机器人后轮越过台阶的能力。

由式(14)可知, 后轮越过台阶的能力与管道机器人本身的参数无关, 只与滑动摩擦系数 μ 有关。由式(9)和式(14)可知, 通过提高轮的滑动摩擦系数既能提高前轮的越台能力又能提高后轮的越台能力。由前述分析知 $\mu=0.75$, 则后轮越台能力 $h_w/D=0.1$ 。 $h_w=0.1 D$, 是后轮直径的1/10, 若后轮与前轮的直径相同, 则后轮的越台高度 h_w 为7.6 mm。越台高度只有前轮的越台高度的1/5, 若要改善后轮越台的能力, 只能增大后轮的摩擦系数和后轮的直径, 由于摩擦系数提高比较困难而且效果不明显, 较可行的方法是增大后轮的直径或者增大后轮的正压力。最大直径理论上不超过155 mm。

2.3 支撑杆组a碰到台阶

支撑杆组a碰到台阶时, 由图3受力分析可知:

$$F_{\text{sa}} \times \cos(60^\circ - \beta) + G = F_{\text{sb}} \times \sin(90^\circ - \beta) + F_{\text{sc}} \times \cos(120^\circ - \beta) \quad (15)$$

由上式解得:

$$F_{\text{sa}} = [F_{\text{sb}} \times \sin(90^\circ - \beta) + F_{\text{sc}} \times \cos(120^\circ - \beta) - G] / \cos(60^\circ - \beta) \quad (16)$$

F_{sa} 的受力有两种情况, 一种为受力方向指向管壁, 即 $F_{\text{sa}} > 0$; 另一种情况与之相反, $F_{\text{sa}} < 0$, 受力方向背向管壁。

$$(1) [F_{\text{sb}} \times \sin(90^\circ - \beta) + F_{\text{sc}} \times \cos(120^\circ - \beta) - G] > 0$$

$F_{\text{sa}} > 0$, 则与支撑杆组b碰到台阶时受力情形相似, 分析过程与支撑杆b之情况相同, 这里不再赘述。分析结果与支撑杆b组的分析结果相同。

$$(2) [F_{\text{sb}} \times \sin(90^\circ - \beta) + F_{\text{sc}} \times \cos(120^\circ - \beta) - G] < 0$$

该种情况下, F_{sa} 的方向不再指向管壁, 而是背向管壁。本研究将图3中 F_{sb} 替换成 F_{sa} , 方向向上。

① 前轮碰到台阶时受力分析:

$$\begin{cases} F_1 \cos \alpha + f_1 \sin \alpha - f_2 = 0 \\ F_1 \sin \alpha - f_1 \cos \alpha + F_2 + F_{\text{sa}} = 0 \\ f_1 D/2 + F_2 L - f_2 D/2 + a F_{\text{sa}} = 0 \\ f_1 = f F_1 \\ f_2 = \mu F_2 \end{cases} \quad (17)$$

上式求解得:

$$(\mu a + f a - f L + \frac{D}{2} \mu f) \sin \alpha + (a - a f \mu - L + \frac{D}{2} \mu) \cos \alpha = f \mu \frac{D}{2} \quad (18)$$

式(18)与式(7)完全相同, 故最后分析结果也相同。

② 后轮碰到台阶时受力分析:

$$\begin{cases} F_2 \cos \alpha - f_2 \sin \alpha + f_1 = 0 \\ F_2 \sin \alpha + f_2 \cos \alpha + F_1 + F_{\text{sa}} = 0 \\ f_1 D/2 + F_2 \cos \alpha D/2 - f_2 D/2 + b F_{\text{sa}} = 0 \\ f_1 = f F_1 \\ f_2 = \mu F_2 \end{cases} \quad (19)$$

上式解得:

$$\frac{h_w}{D} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \right] \quad (20)$$

由解得结果可知, 后轮的越障能力也与支撑杆b组后轮的越障能力相同。故整个支撑杆组a跨越台阶与支撑杆组b跨越台阶的能力是一样的。由于管道机器人的支撑杆组b、c在圆周上是均匀分布的, 它们的跨越障碍的能力相同。

由以上分析可知, 支撑杆组a也与支撑杆组b的越台能力相同, 支撑杆组b与支撑杆组c的越台能力相同。故3组支撑臂组的越台能力相同。它们具有对称性和同一性。这是对三轴差速理论中“输出轴的输出转速 n_{11} 、 n_{22} 、 n_{33} 和总输入转速 n_0 的相对运动关系是

平等的”这一重要结论的验证。在管径为310 mm,弯道直径为200 mm的管道中,研究者利用文中分析方法得出的优化参数,可使管道机器人前轮的越障能力大幅提升,跨越障碍的高度将近为前轮直径的一半。针对后轮可以通过增大后轮的直径或者增大后轮的正压力来提高其越障能力。

3 结束语

笔者应用静力学分析和在可行域寻最优解的方法,验证了三轴差速理论的正确性。针对特定管径的管道,本研究得出了有效解决三轴式差速机器人跨越障碍的机器人结构参数。研究者通过文中的方法,可以计算出针对不同管径中机器人的结构参数,这对三轴式差速机器人理论内容是有效的补充。本研究通过从设计中优化设计参数,提高机器人本身的越障性能,从根源上提高了机器人对环境的独立适应能力。

与其他类型机器人比较,三轴式差速机器人在管道弯道部分通过性方面有明显的优势,但三轴式差速机器人在三通处的通过性问题尚没有得到很好的解决。今后研究者将以此为主要研究方向,以求进一步完善三轴式差速机器人理论。

参考文献(References):

- [1] 甘小明,徐滨士. 管道机器人发展现状[J]. 机器人技术与应用,2003(6):5-7.
- [2] 杨斌久,姜生元. 三轴差速器的设计及应用[J]. 吉林大学学报:工学版,2002,32(4):70-74.
- [3] 姜生元,邓宗全. 三轴差速器及其在管道机器人驱动系统中的应用研究[J]. 中国机械工程,2002,13(10):877-879.
- [4] 张学文,邓宗全. 管道机器人三轴差动式驱动单元的设计[J]. 机器人,2008,30(1):23-24.
- [5] 江旭东,姜生元. 三轴差速器虚拟样机技术研究[C]//第三届中国CAE工程分析技术年会论文集. 大连:[出版者不详],2008:311-315.
- [6] 李长俊,廖柯熹. 管道结垢原因分析及常用除垢方法[J]. 油气储运,2008,27(27):59-62.
- [7] 张学文. 管道机器人三轴差动式驱动单元设计与可靠性研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2008:15-23.
- [8] 庄继德. 汽车通过性[M]. 长春:吉林出版社,1980.
- [9] 唐德威,李庆凯. 三轴差动式管道机器人机械自适应驱动技术[J]. 机械工程学报,2008,44(9):128-133.
- [10] 孔江生,张维良. 橡胶履带的结构分析和改进措施[J]. 工程机械,2002,33(6):27-29.

[编辑:张翔]

(上接第1370页)

5 结束语

为提高模具自由表面的气囊抛光加工效果,本研究结合实验对此进行了研究,并得到了如下结论:

(1) 气囊抛光头在模具自由表面上的接触面积和接触宽度满足赫兹弹性接触理论,能用赫兹接触理论近似计算得到;在试验中研究者可通过调节气囊抛光头下压量来对接触面积和接触宽度进行调节。

(2) 在气囊抛光过程中,接触力的值会随着模具曲率半径变化而改变,而通过改变气囊抛光头下压量和内部充气压力可对接触力进行调节。

(3) 在模具自由曲面包含不同曲率半径曲面的情况下,研究者通过调节气囊抛光头的下压量和内部充气压力,可以改善模具自由曲面的抛光效果和抛光质量,提高曲面抛光的均匀度。

参考文献(References):

- [1] WALKER D D, BROOKS D, KING A, et al. The 'precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. Optics Express,2003,11(8):958-964.
- [2] 计时鸣,张利,金明生,等. 气囊抛光技术及其研究现状

- [J]. 机电工程,2010,27(5):1-12.
- [3] 计时鸣,金明生,张宪,等. 应用于模具自由曲面的气囊抛光新技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [4] WEULE H, TIMMERMAN S, EVERSHEIM W. Automation of the surface finishing in the manufacturing of the manufacturing of dies and molds[J]. Annals of the CIRP, 1990,39(1):191-200.
- [5] 袁楚明,周祖德,陈幼平,等. 模具曲面抛光时表面去除的建模与试验研究[J]. 机械工程学报,2002,38(12):98-102.
- [6] 宋剑锋,姚英学,谢大纲,等. 平面和曲面光学零件气囊抛光材料去除的比较研究[J]. 光学技术,2008,34(z1):63-68.
- [7] 金明生. 模具自由曲面气囊抛光机理及工艺研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.
- [8] 瓦伦丁 L. 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [9] ZHAO J, KONDO T, NARAHARA H, et al. Study on automatic polishing of mould curved surface at constant pressure intensity[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1994,7(4):16-22.
- [10] 白新理,杨开云,王文媛,等. 不可压缩超弹性材料大变形接触分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2001,33(1):16-19.

[编辑:罗向阳]