

# 冲击式小型气动马达机械特性研究

田 威, 李小宁, 郭 钰

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 为了适应易燃、易爆及防磁的工作环境, 该文研制了一种冲击式小型气动马达。介绍了冲击式小型气动马达的工作原理和具体结构组成, 理论分析了其喷嘴流量特性和叶轮受力情况, 并通过计算机仿真研究了其主要结构参数变化对输出转矩的影响规律。为了对马达输出的转矩和机械功率进行实验研究, 设计了一套小型机械特性测试装置。实验研究结果表明: 冲击式小型气动马达输出转矩与转速具有良好的线性关系, 调速范围广, 符合实际应用的要求。

**关键词:** 小型气动马达; 机械特性; 小转矩; 流量特性

**中图分类号:** TH 138.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9830(2006)02-0227-04

## Mechanical Characteristics of Impacted Mini-air-motor

TIAN Wei, LI Xiao-ning, GUO Yu

(School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** An impacted mini-air-motor is studied and developed to be applied in the combustible, explosive and antimagnetic conditions. The operating principle and the structure of the mini-air-motor are discussed. The discharge characteristics of the nozzle and the mechanical characteristics of the mini-air-motor are analyzed. The effect of main structure parameters on the output torque of the mini-air-motor is simulated. In order to study the mechanical characteristics of the mini-air-motor, a measurement instrument is designed. The experimental results indicate that the output torque of the motor has good linear relation with the rotational speed, and the range of the speed regulation is very wide. The impacted mini-air-motor is suitable to the application condition.

**Key words:** mini-air-motor; mechanical characteristics; mini-torque; discharge characteristics

在高速旋转状态下具有一定转矩输出的微小驱动器在国民生产的各个领域得到了广泛应用, 比较常见的是微型电机驱动装置。微型电机具有

很突出的优点, 如体积小、效率高、结构简单等, 但在一些易燃易爆和防磁的场合, 以及需要更高转速的工作情况, 就不适合使用微型电机作为驱动

收稿日期: 2005-03-22 修回日期: 2006-01-09

作者简介: 田威 (1977-), 男, 湖北罗田人, 博士生, 主要研究方向: 机电液系统控制技术, E-mail: tw1004@sina.com; 通讯作者: 李小宁 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 先进制造系统理论, 机电液系统控制技术。

装置。这时可以考虑使用小型气动马达,气动马达具有安全防爆、不怕淋水及过载、不产生磁干扰等优点,但将这种传动方式应用到高速旋转状态下输出微小转矩的微小驱动器上的研究却比较少。按照工作原理,气动马达分为静力式(容积式)和动力式(蜗轮式),静力式输出的速度有限,启动性能也不理想,不适于小型气动马达的开发;动力式气动马达可以达到很高的转速,启动性能良好,可以满足实际的需求<sup>[1,2]</sup>。本文在动力式气动马达工作原理的基础上研究开发了一种冲击式小型气动马达,对其输出机械特性进行了仿真和实验研究。

## 1 冲击式小型气动马达的工作原理及结构

冲击式小型气动马达是将压缩气体通过喷嘴喷射到叶轮上,利用气体的冲击动能推动叶轮转子转动。图 1 给出了冲击式小型气动马达的基本工作原理和能量转换过程,其中  $p_i$  ( $i=0, 1, 2$ ) 为气体在各个阶段的压力,  $c_i$  ( $i=0, 1, 2$ ) 为气体在各个阶段的速度。首先,具有一定温度和压强的压缩气体在固定不动的喷嘴中进行膨胀加速,气体的压力和温度降低,速度增加,将压缩气体的部分压缩能转换成气体的动能;然后,沿喷嘴出口方向喷出的高速气流冲击动叶轮,气流速度的大小和方向都发生变化,对动叶轮产生推动力,推动叶轮旋转做功,通过转轴向外输出机械功。冲击式小型气动马达由单级组成,动叶轮的叶片形状近似对称,可以理解为纯冲动级,压缩气体只在喷嘴中膨胀,在动叶轮中不膨胀,不考虑能量损失时,叶片气流通道进出口的压强相等,相对速度也相等。

根据上述工作原理,本文研制的冲击式小型气动马达的结构如图 2 所示,主要的结构尺寸列于表 1。表 1 中  $l$  表示叶片数,  $r$  表示叶轮平均半径,  $b$  表示叶片宽度,  $h$  表示叶片高度,  $\alpha$  表示喷嘴出口角度,  $\beta$  表示叶片出口角度。冲击式小型气动马达主要由喷嘴、叶轮、轴、外罩和端盖组成,叶轮轴由 2 个滚珠轴承支撑,轴承和轴承座置于端盖和外罩内,端盖和外罩通过螺纹连接固定。由于气体在排空的过程中会产生一定噪音,在对噪音有特殊要求的场合,需要进行消声降噪处理,马达外罩的末端留有机械接口,可以方便地与消声器连接,从而实现小型气动马达与消声器的集成。

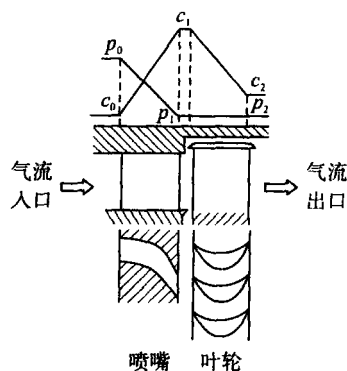


图 1 工作原理及能量转换过程

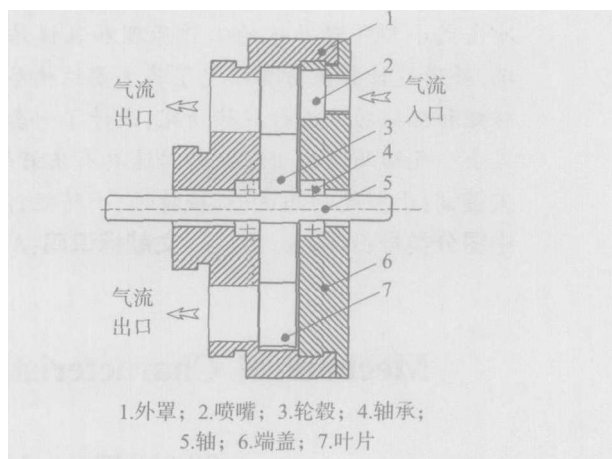


图 2 冲击式小型气动马达结构示意图

表 1 主要结构尺寸

$l$	$r/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$\alpha/^\circ$	$\beta/^\circ$
18	46	7	9	45	30

## 2 理论输出力矩与结构参数的关系

### 2.1 喷嘴流量特性分析

叶轮机械中,喷嘴结构一般采用叶栅的形式,即由 2 个相邻的静叶片和上下 2 块隔板组成,流道结构见图 1。

假设气体为理想气体,在喷嘴中气流的速度远大于气体与外界进行热交换的速度,气体流经喷嘴所造成的能量损失远小于它具有的总能量,即可认为气体在喷嘴中流动时来不及与外界进行热交换,故可将该热力过程简化为绝热过程;若不计流动中的摩擦损失,该能量转换过程为等熵过程<sup>[3]</sup>。设喷嘴的几何面积为  $A_1$ ,上游绝对压力为  $p_0$ ,下游绝对压力为  $p_1$ ,上游的绝对温度为  $T_0$ ,于

是通过喷嘴的质量流量  $q_m$  为

$$q_m = K A_e p_0 \left( \frac{\gamma}{\sqrt{R T_0}} \right) \quad (1)$$

式中:  $K = \sqrt{2} \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$  为绝热指数;  $A_e = \mu A_1$  为有效面积;  $\mu$  为有效面积系数;  $R$  为气体常数; 体积流量  $q_v$  为

$$q_v = 7.567 \times A_{p0} \left( \frac{\gamma}{\sqrt{293/T_0}} \right) \times 10^{-3} \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中的  $\left( \frac{\gamma}{\sqrt{293/T_0}} \right)$  和  $\left( \frac{\gamma}{\sqrt{293/T_0}} \right)$  分别定义为

$$\left( \frac{\gamma}{\sqrt{293/T_0}} \right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} & 0.528 < \gamma \leq 1 \\ 0.2588 & 0 < \gamma \leq 0.528 \end{cases} \quad (3)$$

$$= p_1 / p_0 \quad (4)$$

对于空气,  $R = 287 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\gamma = 1.4$ ,  $K = 2.646$ ,  $\mu = 0.528$ .

## 2.2 叶轮受力分析

为分析叶轮内气体的流动情况, 可引入以下基本假设: (1) 叶轮的叶片数为无穷多, 叶片无限薄, 因此叶轮内的流动可以看作是轴对称的, 并且相对速度的方向与叶片表面相切; (2) 相对流动是定常的; (3) 轴向速度在过流断面上均匀分布。

为研究叶片与气体交换的能量, 需要研究叶片进出口处的气体流动情况, 分析叶轮进出口的速度三角形。图 3 为气流冲击叶轮叶片的作用示意图。

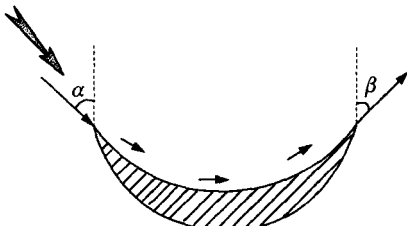


图 3 气流冲击叶轮叶片示意图

由于叶轮是旋转的, 故流体质点相对于静坐标系的绝对运动与相对于叶轮的运动是不同的。根据速度的合成定律, 绝对运动是相对运动和牵连运动的矢量和

$$c = w + u \quad (5)$$

式中:  $c$  为绝对运动速度;  $w$  为流体质点相对于叶轮的速度, 称相对速度;  $u$  为叶轮上与所考查的流体质点重合点的速度。由上述分析不难得出叶轮进出口速度的三角形表示, 其中,  $c$  和  $w$  两个矢量都可以分解为圆周分量和轴向分量, 下标  $m$  表示轴向分量, 下标  $u$  表示圆周分量, 叶轮进出口速度三角形如图 4 所示。

设叶轮的转速为  $n$ , 常温常压状态下声速为  $340 \text{ m/s}$  可以得出叶轮输出的转矩  $M$  和机械功率  $N$  分别为

$$M = q_m r (c_{1u} - c_{2u}) \quad (6)$$

$$N = M \times 2 \pi n \quad (7)$$

式中:  $c_{1u}$  和  $c_{2u}$  分别为  $c_1$  和  $c_2$  的周向分速度, 根据速度三角形关系可以得出

$$c_{1u} = c_1 \times \cos \alpha \quad (8)$$

$$c_{2u} = u_2 - w_2 \cos \beta \quad (9)$$

式中:  $u_1 = u_2 = u = 2 \pi n r$ ,  $u$  为周向叶轮速度;  $w_1 = w_2 = \sqrt{u_1^2 + c_1^2 - 2 c_1 u_1 \cos \alpha}$ , 将式 (8) 和式 (9) 代入式 (6) 可得

$$M = q_m \cdot (c_1 \cos \alpha - u + \sqrt{u^2 + c_1^2 - 2 c_1 u \cos \alpha} \cos \beta) \quad (10)$$

式中

$$c_1 = \begin{cases} 7.567 p_0 \left( \frac{\gamma}{\sqrt{293/T_0}} \right) \times 10^{-3} & 0.258 < \gamma \leq 1 \\ 340 & 0 < \gamma \leq 0.528 \end{cases}$$

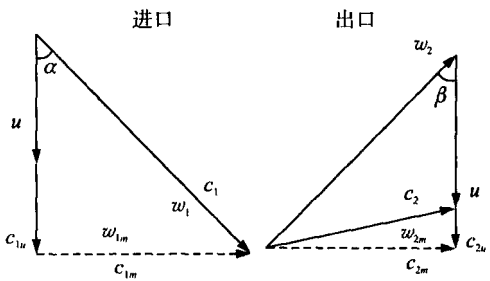


图 4 叶轮进出口速度三角形

## 2.3 结构参数对输出转矩影响的仿真分析

根据上文分析, 影响冲击式小型气动马达输出性能的主要因素集中在 3 个方面: 喷嘴出口角度, 叶片出口角度, 叶轮平均半径  $r$ 。冲击式气动马达是一种旋转驱动器, 在实际应用中最关心的是其输出的转矩特性, 所以需要研究这 3 个参数的变化对输出转矩的影响。从第 2.2 节的理论模型出发, 通过计算机仿真, 可以得出  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $r$  的变化对冲击式气动马达输出转矩的影响规律。图 5 给出这 3 个因素对冲击式小型气动马达的输出转矩影响的仿真曲线。计算仿真条件为: 驱动气压  $p_s = 0.3 \text{ MPa}$ , 管道有效截面积  $A_e = 1.6 \text{ mm}^2$ 。

根据对仿真结果的分析, 可以得出: 输出转矩与转速间存在良好的线性关系, 转矩随着转速的增大而减小; 在相同工作条件下, 减小喷嘴出口角度  $\alpha$  或叶轮出口角度  $\beta$  的值都能增加冲击式气动马达的输出转矩, 增加叶轮平均半径  $r$  也能增加气动马达的输出转矩。仿真结果能够为冲击式小型气动马达的设计和改进行提供一定的理论依据。

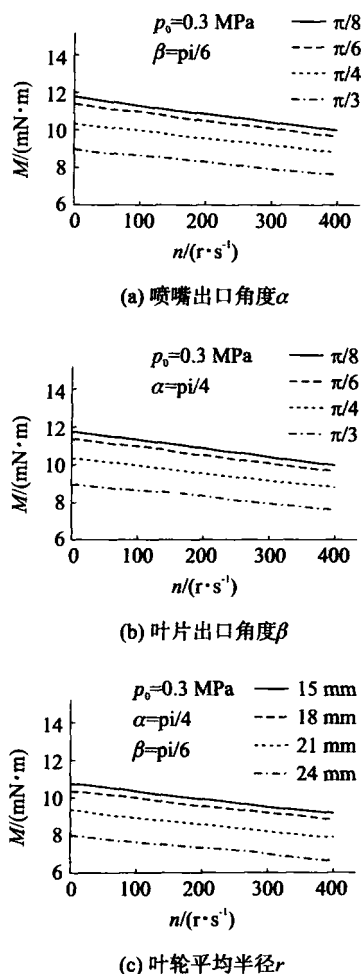


图5 主要结构参数对输出转矩的影响

### 3 输出机械特性的实验研究

#### 3.1 实验装置

冲击式小型气动马达工作的特点是转速高,输出的转矩较小,而且自身的结构体积较小,应用常规的测试方法不是很理想。根据其工作特点,在相位差测量转矩的理论基础上,设计了一套动态小转矩测量装置,实现了对冲击式小型气动马达输出转矩和功率特性的测量,测试装置组成如图6所示。

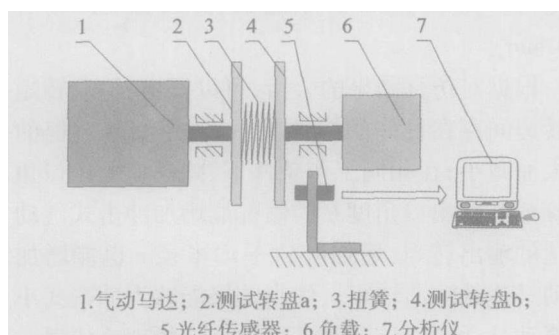


图6 机械特性测量装置

该测试装置主要由测试圆盘、扭簧、光纤光电传感器和分析仪组成。当冲击式小型气动马达工作时,负载电机将被带着一起旋转,由于负载电机旋转时产生一定的逆向转矩,导致扭簧变形,使转盘a和转盘b产生一定的角度偏差,通过反射型光纤光电传感器读出该偏差,得到扭簧因为形变而产生的转矩<sup>[4-6]</sup>。如果把扭簧右侧部分看成一个整体,其力平衡方程式为

$$M = M_0 + M_1 = M_0 + k \times \quad (11)$$

式中: $M$ 为马达输出的转矩; $m_0$ 为动摩擦力矩; $M_1$ 为负载逆转矩; $k$ 为扭簧弹性系数; $\times$ 为扭簧旋转偏转角。冲击式小型气动马达输出的机械功率为

$$N = M \times 2 \times n \quad (12)$$

#### 3.2 实验结果及分析

应用本测量装置对冲击式小型气动马达输出的转矩和功率特性进行实际测量。实验中,供气压力  $p_s = 0.3 \text{ MPa}$ ,环境温度  $T = 300 \text{ K}$ ,管道有效截面积  $A_e = 1.6 \text{ mm}^2$ ,环境气体压力  $p_a = 0.1 \text{ MPa}$ 。图7是实际测量的实验结果,“\*”表示实验数据,曲线为拟合曲线。实验结果表明,冲击式小型气动马达输出的转矩与转速具有较好的线性关系,与图5中的仿真结果基本一致,但仿真计算的转矩随转速增大而减小的幅度比实验结果小一些,这主要是由于仿真计算中引入了3条理想化假设条件,实际实验条件达不到这个要求。同时,根据图7中的功率曲线,当气动马达的转速达到额定转速时(当前实验条件下为  $12480 \text{ r/min}$ ),输出功率最大,也就是转换效率达到最大,当转速小于额定转速时,输出功率随速度的增大而增大。从实验结果还可以看出,冲击式气动马达对负载转矩的适应性比较广,可根据实际条件调整供气压力获得合适的输出转速和转矩,同时,具有较宽的调速范围。由于气体的压缩性能,当负载转矩过载时,不会对冲击式气动马达造成损伤。

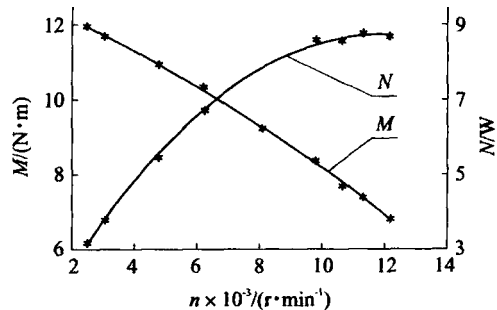


图7 实验测试结果

(下转第235页)

大。油润滑时由于不存在水解作用,随辐照剂量加大磨损率减小,这与辐照导致的交联结构有关。

### 3 结论

(1) 射线辐照可改善 PA1010 在干摩擦条件下的承载能力,且高剂量辐照的样品承载能力改善更明显;(2) 本试验条件下,所有剂量的射线辐照均提高了 PA1010 在干摩擦及油润滑下的耐磨性,且随着剂量的加大,磨损率降低;(3) 水润滑条件下,低载时辐照剂量 80 kGy 的样品磨损率最低,高载时辐照样品磨损率都高于未辐照样品。

#### 参考文献:

- [1] 熊党生,陈磊,张德坤.  $\text{La}_2\text{O}_3$  填充 PA1010 复合材料的摩擦磨损性能 [J]. 中国矿业大学学报, 2001,

30(5): 476 - 179.

- [2] 熊党生,陈磊,王振中. 稀土化合物填充 PA1010 复合材料的摩擦学特性 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 611 - 615.
- [3] 熊党生. 氧离子注入增强尼龙 1010 的耐磨性 [J]. 高技术通讯, 2002, 5: 60 - 63.
- [4] 熊党生. 氮离子注入尼龙 1010 的摩擦学特性 [J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(2): 150 - 152.
- [5] Gehring J, Zyball A. Radiation crosslinking of polymers: status, current issues, trends and challenges [J]. Radiat Phys Chem, 1995, 46(4-6): 931 - 936.
- [6] Xiong D S, Ge S R. Friction and wear properties of UHMWPE/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic under different lubricating conditions [J]. Wear, 2001, 250: 242 - 245.
- [7] 罗延龄,赵振兴. 高分子辐射交联技术及研究进展 [J]. 高分子通报, 1999, 12: 88 - 99.

(上接第 230 页)

### 4 结论

本文通过理论分析、计算仿真和实验对冲击式小型气动马达的输出机械特性进行了研究。仿真结果和实验结果基本一致,冲击式小型气动马达输出的转矩与转速存在良好的线性关系,随着转速的增加而减小。当转速达到额定转速时,马达输出的机械功率最大,此时的转换效率也最高。根据仿真研究结果,适当减小喷嘴出口角度或叶片出口角度,或增加叶轮平均半径  $r$  均能提高小型气动马达的输出转矩和功率,为后期的结构改进提供了一定的理论依据。本文研制的冲击式小型气动马达应用气压驱动方式,不仅具有防爆防爆和不怕淋湿的特点,而且能够在高速旋转

状态下输出较小的转矩,满足实际应用的需求。

#### 参考文献:

- [1] 机电一体化技术手册编委会. 机电一体化技术手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- [2] 曲补和. 50 马力气动马达研制 [J]. 凿岩机械气动工具, 1994(2): 32 - 36.
- [3] 李建藩. 气压传动系统动力学 [M]. 广州:华南理工大学出版社, 1991.
- [4] 吴维厚,李金泉. 一种微转矩测量仪 [J]. 天津理工学院学报, 1996(2): 18 - 21.
- [5] Dirk K, Wemer L. Signal processing for magnetic micro torque sensors [J]. Sensors and actuators, 1995: 315 - 319.
- [6] Mathieson B J. Micro-torque measurements for a prototype turbine [J]. Micro-mech & Micro-eng, 1994(4): 129 - 139.