

# 用于机器人自动钻铆的自动供钉系统试验研究

龚 辉, 朱柏荣, 方 强\*

(浙江大学 机械工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为了解决飞机数字化装配中自动钻铆机铆钉输送困难的问题, 介绍了一套可以为机器人自动钻铆终端执行器输送铆钉的自动供钉系统。铆钉从供钉装置输送到插钉机构采用气管输送, 在输送过程铆钉由于气压、弯曲半径等原因容易卡在输钉管中, 为此运用结构分析、受力分析以及运动状态分析的方法, 并结合流体力学知识对管中的铆钉进行了分析计算, 得出了满足铆钉顺利输送的最小弯曲半径和最小输送气压等必要条件。实验计算结果验证了自动供钉系统铆钉管道气动输送的可行性。

**关键词:** 飞机装配; 铆钉输送系统; 最小输送气压

中图分类号: TH122; TP202.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0404-05

## Experimental study of automatic rivet feeding system of robot automatic drilling & riveting

GONG Hui, ZHU Bai-rong, FANG Qiang

(Department of the Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that it's hard to send rivets to the automatic drilling & riveting machine in the assembly of aircraft, an automatic rivet feeding system was introduced which can deliver rivets for the robot automatic drilling & riveting end-performer. A pipe was used to send the rivets from rivet feeding system to rivet insert machine, the rivets were easily stuck in the delivering pipe when they were delivered because of the air pressure or minimum bending radius and other reasons, the rivets in the pipe were analyzed and calculated on the structure, stress and motion state with the knowledge of fluid mechanics, the necessary conditions were obtained in which the rivets could be delivered smoothly, like minimum bending radius and minimum air pressure. Finally, the results by experiments validate the feasibility of rivet pneumatic delivering in a pipe.

**Key words:** assembly of aircraft; rivet feeding system; minimum air pressure of feeding

## 0 引 言

在各航空制造业发达的国家, 自动钻铆技术早已被广泛应用。例如, 美国波音公司在波音 767 机翼的装配制造中便采用了由 4 台自动装配机组成的翼梁自动装配系统, 该系统能自动定位零件、自动确定孔位、自动测厚、自动钻铆, 每个工作循环只需 8 s<sup>[1]</sup>。

飞机装配中的自动钻铆技术在我国航空制造业起步较晚, 与国际航空制造的先进水平之间的差距还十分悬殊, 有待进一步开发和应用<sup>[2]</sup>。

在此背景下, 本研究设计了一种集钻铤、点胶、插

钉于一体的多功能自动钻铆终端执行器, 同时研制了一套相应的自动供钉系统来为终端执行器的插钉系统提供并输送铆钉。该系统采用气动传输铆钉, 具有便于实现、可靠性高等优点。但是, 由于技术不成熟等原因, 该系统还存在一些问题, 如在取钉过程中铆钉容易掉落, 在送钉时铆钉容易卡住等。法国 AHG 公司表示, 自动钻铆停机故障的 90% 都是由供钉系统造成的<sup>[3]</sup>。国外在解决卡钉问题时一般采用在装置中加分选器的方法, 或者采用合理的铆钉排列方式<sup>[4]</sup>。但是由于国外的铆接机基本采用固定式的供钉机构, 即供钉装置与铆接机是相互固定的, 输钉管沿着铆接机支撑架布

收稿日期: 2011-10-31

作者简介: 龚 辉(1987-), 男, 浙江兰溪人, 主要从事飞机数字化装配方面的研究。E-mail: G\_Hui616@foxmail.com

通信联系人: 方 强, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: fangqiang@zju.edu.cn

置,管道不会随着铆接机移动而移动,这就降低了供钉的难度<sup>[5-6]</sup>,而本研究介绍的供钉机构与铆接机之间是有空间位置变化的,自动钻铆机随着机器人手臂摆动而移动,这使输钉管可能有各种不同的位姿,包括不同的弯曲半径、输钉高度等,这大大增加了供钉的难度。

本研究通过气动学和力学的分析,得出可满足铆钉在管道内顺利输送的气压条件、管道材料大小要求、最小弯曲半径等,并经过实验来验证分析结果。

## 1 自动供钉系统

### 1.1 机械结构

该自动供钉系统硬件主要由底座框架、电机驱动部分、取钉吹钉组件、储钉夹等4部分组成。

自动供钉机构如图1所示,机构框架上部装有8组钉夹(每边4组),每组钉夹分别有4根装钉管,不同大小的钉管相应存放不同型号的铆钉。伺服电机通过丝杠可以带动滑台上的取钉吹钉组件前后移动实现铆钉选型(移动行程由限位开关控制,定位则由零位开关和电机编码器控制)。取钉吹钉组件完成取钉动作,并将取到的铆钉通过吹钉管输送到插钉系统。

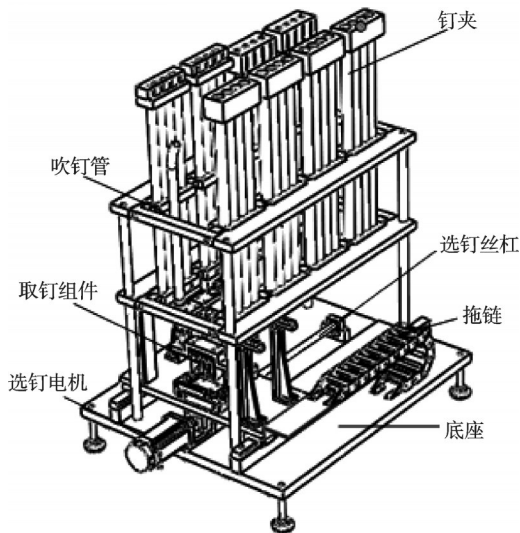


图1 自动供钉机构

该系统除了选钉动作是通过伺服电机驱动实现,其余动作均通过气缸实现,三位五通电磁阀实现对气缸的控制。此外,该系统还有若干传感器,其作用是在系统运作的过程中检测一些关键步骤和关键部位铆钉是否顺利到位以及检测钉管中的铆钉是否有存余量等,提高了系统的安全性能。

### 1.2 控制系统

控制系统结构图如图2所示,该机构的控制系统包括两个部分:电机驱动部分和气缸驱动部分。电机驱动部分主要包括控制卡、驱动器、伺服电机以及专用的

驱动电缆和旋变反馈线。气缸驱动部分主要包括各种类型的气缸、电磁阀以及控制电磁阀的逻辑控制模块。

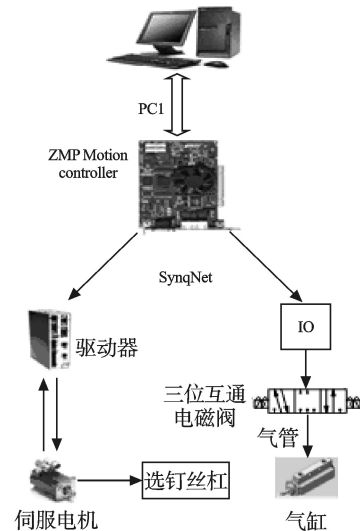


图2 控制系统结构图

运动控制卡是一种基于工业PC机、用于各种控制运动场合的上位控制单元,该机构的控制系统选用Danaher公司的ZMP-SynqNet-PCI运动控制卡,通过PCI总线技术与工控机连接。驱动器选用Danaher公司的S20360型驱动器,通过动力线和反馈线与伺服电机相连。伺服电机选用Kollmorgen公司的AKM 22E型交流伺服电机,额定转速3 500 r/min,伺服电机通过丝杠带动取钉吹钉组件移动实现选钉。电磁阀选用中位封闭型三位五通电磁阀,额定电压24 V,由Danaher公司的Slice IO逻辑控制模块控制,继而控制气缸伸缩。驱动器和Slice IO与控制卡之间采用SynqNet总线技术进行通信。

### 1.3 供钉工艺流程

该自动供钉系统的基本循环动作包括如下几步(工艺流程图如图3所示):

- (1) 系统通电启动;
- (2) 系统自检,伺服电机进行找零,各气缸复位;
- (3) 选钉:伺服电机启动,带动取钉吹钉组件沿着选钉丝杠进给到装有目标型号铆钉的钉管位置(半闭环控制);
- (4) 取钉:取钉吹钉组件上升到取钉工位,顶针气缸顶出,铆钉下落,吸盘吸气,顶针气缸收回,取钉组建下降,取钉动作完成;
- (5) 吹钉:取钉完成后,取钉吹钉组件运动到吹钉工位,吸盘改吸为吹气,进行吹钉动作;
- (6) 该系统将铆钉吹到自动钻铆机构后,各气缸复位,等待下一个送钉命令。

在目前普遍使用的自动钻铆机中,供钉装置与铆接装置之间是固定的,所以输钉管道也是固定不动的,

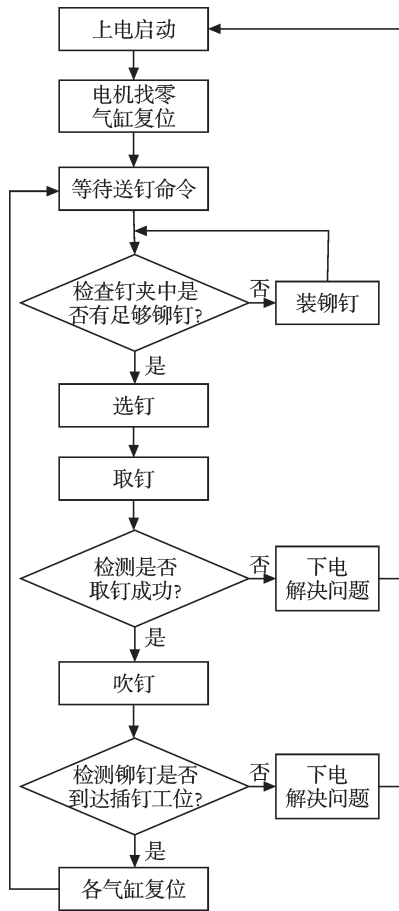


图3 工艺流程图

这样就便于铆钉的输送。然而本研究介绍的自动钻铆机应用于机器人自动钻铆中,自动钻铆终端执行器随着机器人的运动而运动,自动供钉系统则放在平台上,所以输钉管运动情况复杂,不同的机器人位姿对应有不同的管道输送高度、弯曲半径等。在实验中,铆钉极易在吹钉过程中卡在输钉管中。

## 2 柔性吹钉管道易卡钉问题的分析与计算

该管道卡钉问题可能与以下几方面因素有关:管道最小弯曲半径、管道材料特性和尺寸大小等参数、气动力大小等。

### 2.1 输钉管最小弯曲半径计算

由于普通软管极易变形或被压扁从而导致铆钉无法通过,实际中本研究选用有钢丝加固的软管,该软管在弯曲时几乎没有变形,也不易被压扁,而且能够达到的最小弯曲半径大约为 60 mm,否则软管将被损坏。在输钉管道弯曲处铆钉的状态分析如图 4 所示,本研究假设此时铆钉紧贴管道左侧内壁,那么管道直径  $S$  必须满足公式(为了便于计算,近似认为  $\beta=(D+3d)/4$ ):

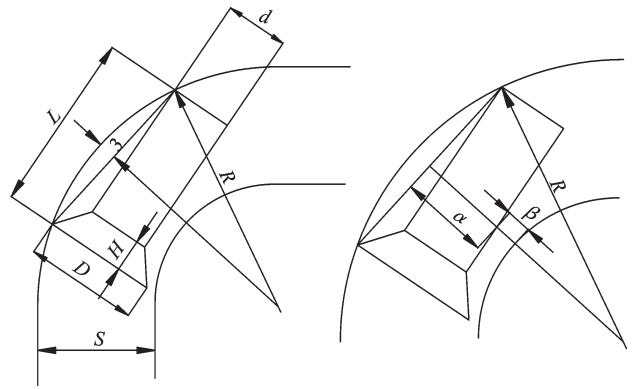


图4 铆钉通过弯道时状态分析

$$S = m + \frac{D+3d}{4} + \alpha \quad (1)$$

式中: $m$ —铆钉与输钉管道内壁两个接触点的连线与管道弯曲顶点之间的垂直距离。

由三角关系可得:

$$m = R - \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4} - \frac{D^2}{16} - \frac{d^2}{16} + \frac{D \times d}{8}} \quad (2)$$

将式(1)和式(2)联立可得:

$$R = \frac{2L^2 + 8(S - \alpha)^2 + D^2 + 5d^2 + 2D \times d}{4(4S - 4\alpha - D - 3d)} + \frac{(D + 3d)(S - \alpha)}{D + 3d - 4(S - \alpha)} \quad (3)$$

式中: $R$ —铆钉可通过的最小弯曲半径, $S$ —输钉管道内径, $L$ —铆钉全长, $D$ —铆钉沉头内径, $d$ —铆钉公称直径, $\alpha$ —铆钉能通过管道与管道内壁之间的最小间隙。

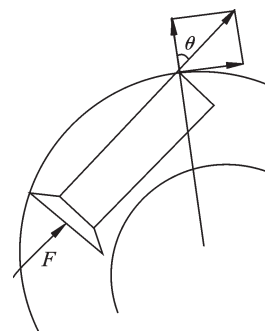


图5 弯道中铆钉摩擦力分析

弯道中铆钉摩擦力分析如图 5 所示,本研究再根据图 5 分析铆钉在弯道中的摩擦力情况,设铆钉与管道内壁的摩擦系数为 $\mu$ ,假设气体作用在铆钉上的力都等效为铆钉轴向的力 $F$ ,弯曲半径方向与铆钉轴向方向夹角为 $\theta$ ,则有: $\mu F \cos \theta = F \sin \theta$ ,即:

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (4)$$

由三角关系得:

$$\frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} = \frac{\sqrt{L^2 + (\frac{D-d}{2})^2}}{2R} \quad (5)$$

即:

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{(\mu^2 + 1)(\frac{1}{4}D^2 + \frac{1}{4}d^2 - D \times d + L^2)} \quad (6)$$

根据式(6),在铆钉的型号尺寸确定的情况下,只要确定输钉管道的内径和铆钉能通过管道的最小间隙,就可以得出能使铆钉顺利通过输钉管的最小弯曲半径。即只要管道的弯曲半径大于这个值,假设气压和气量足够大,那么铆钉就不会发生卡住的现象。下面以两种常用型号的铆钉为例进行计算:

(1) 90° 沉头铆钉,公称直径  $d=4^{\pm 0.08}$  mm,  $D=7^{\pm 0.18}$  mm,长度取最大  $L=12$  mm,本研究考虑弯曲时管道自身的变形,取内径  $S=10$  mm 的输钉管道,铆钉能够通过的最小间隙  $\alpha=1$  mm,摩擦系数  $\mu=0.7$ ,分别代入公式(3)和公式(6),得:

$$\begin{cases} R_{\min} = 6.4 \text{ mm} \\ R_{\min} = 7.0 \text{ mm} \end{cases}$$

(2) 120° 沉头铆钉,公称直径  $d=5^{\pm 0.08}$  mm,  $D=9.5^{\pm 0.18}$  mm,长度取  $L=12$  mm,本研究考虑弯曲时管道自身的变形,取内径  $S=12$  mm 的输钉管道,铆钉能够通过的最小间隙  $\alpha=1$  mm,摩擦系数  $\mu=0.7$ ,分别代入公式(3)和公式(6),得:

$$\begin{cases} R_{\min} = 6.3 \text{ mm} \\ R_{\min} = 6.8 \text{ mm} \end{cases}$$

综上所述,在管道没有变形的情况下铆钉可以通过很小的弯曲半径,其值远远小于实际能够达到的最小弯曲半径 60 mm,所以该装置的输钉管道在输送气压和气量均足够的情况下不存在弯曲半径过小导致铆钉卡住的问题。

### 2.2 最小输钉气压计算

本研究首先计算在输钉管竖直的情况下铆钉的受力情况,如图 6 所示,输钉管道比铆钉沉头最大直径略大,铆钉在管道中不可能保持竖直,会倾斜角度  $\theta$ 。

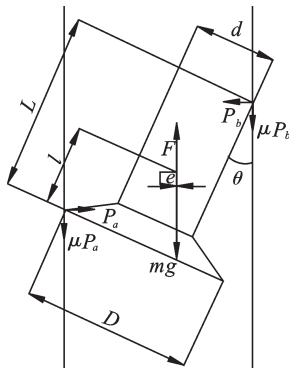


图 6 铆钉在竖直管道中受力分析

由于角度  $\theta$  很小,为了方便计算忽略不计。铆钉长度  $L$ ,沉头直径  $D$ ,公称直径  $d$ ,重心到沉头断面距离  $l$ ,重心到管道轴线距离  $e$ ,管道内壁对铆钉作用力分别为  $P_a$  和  $P_b$ ,摩擦系数  $\mu$ ,铆钉受重力  $mg$ ,受气体向上推力  $F$ 。则根据力平衡和力矩平衡可得(观察公式可知  $e$  为负值,即图中铆钉重心应在管道轴线左边):

$$\begin{cases} P_a = P_b \\ e(F - mg) + P_b(L - l) + \frac{D}{2} \mu P_a + l P_a = \frac{d}{2} \mu P_b \end{cases} \quad (7)$$

要使铆钉向上运动,则有:

$$F - mg \geq \mu(P_a + P_b) \quad (8)$$

将公式(7)和公式(8)联立,得:

$$L \geq \mu(2e + \frac{d}{2} - \frac{D}{2})$$

显然  $2e < d$ ,则有:

$$L > \mu \frac{3d - D}{2} \quad (9)$$

本研究对铆钉竖直方向上的受力分析得:  $F > \mu(P_a + P_b) + mg$ ,又  $P_a = P_b \leq mg$ ,留足够余量取  $P_a = P_b = mg$ ,代得:

$$F > mg(2\mu + 1) \quad (10)$$

本研究以较大的沉头 6 mm × 16 铆钉为例,铆钉质量为  $1.2 \times 10^{-3}$  kg,取摩擦系数为  $\mu=0.7$ ,代入公式(10)得:  $F > 0.02$  N,同时公式(9)满足条件。即要保证铆钉能够顺利通过输钉管,必须使铆钉在输钉管出口处还能受到大小至少为 0.3 N 的气压推力,这个推力是由铆钉上方和下方的压强差产生的,上、下作用面积可以考虑为相等,铆钉沉头直径为  $D=10.4$  mm,沉头面积为:  $S_D = 0.25 \pi D^2 = 84.9 \text{ mm}^2$ ,压强差为:  $\Delta P = F/S_D = 0.02 \text{ N} / 84.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 235.6 \text{ Pa}$ ,由流体力学局部压力损失公式<sup>[7]</sup>得关系式:

$$\Delta P = \left[ 0.5 \left( 1 - \frac{S_{\text{小}}}{S_{\text{大}}} \right) + \left( 1 - \frac{S_{\text{小}}}{S_{\text{大}}} \right)^2 \right] \left( \frac{S_{\text{大}}}{S_{\text{小}}} \right)^2 \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

式中:  $S_{\text{小}}$ —软管截面积与铆钉截面积之差,  $S_{\text{大}}$ —软管截面积,  $v$ —铆钉前端气体流速。

本研究取软管内径为 12 mm,将各数据代入公式(11)计算得  $v=17.7$  m/s,相比之下管道内的压力损失忽略不计,则本研究取气体进入管道初始速度为  $v_0 = v = 17.7$  m/s。

根据参考文献[8],输钉软管进口空气密度公式为:  $\rho = P/RT$ ;管中空气质量流量公式为:  $q = \rho_a \cdot q_a$ ;管入口处气流速度公式:

$$v_0 = q / (\rho \cdot S_{\text{大}}) \quad (12)$$

式中:  $R$ —气体常数,取  $R=287$ ;  $T$ —气体热力学温度,取

$T=300$ ;  $P$ —输入气压;  $\rho_a$ —标准状态下空气的密度,  $\rho_a=1.185 \text{ kg/m}^3$ ;  $q_a$ —空气流量, 取  $q_a=500 \text{ L/min}$ 。

结合上述3个公式, 代入数据计算得结果:  $P=4.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

综上所述, 输钉管进口的最小吹钉气压为  $4.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 及气源气压不能小于该值, 否则将有可能因为推力不足而导致铆钉在管中卡住。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验用品及实验条件

本研究准备内径分别为10 mm和12 mm的输钉管各8 m、各种型号的铆钉若干以及可调节气压的气源接口。实验环境为常态, 另外分别人为制造各种输钉管的状态条件, 并多次实验记录数据验证其可行性和可靠性:

(1) 弯曲管道使其达到最小弯曲半径60 mm, 并制造不同数量的最小弯曲半径处进行试验;

(2) 将输钉管出口抬高至机器人手臂能达到的最大高度;

(3) 将输钉管布置为竖直状态, 验证气源动力;

本研究结合以上几种状态进行了实验。

#### 3.2 实验结果

在以上几种实验条件下, 本研究对不同铆钉进行重复性实验, 进气气压取  $P=4.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 实验数据如表1所示, 当管道有两处最小弯曲半径处时, 送钉可靠性即达不到要求。在实际应用中, 机器人手臂高度一般不会高于供钉机构4 m, 且输钉管的布置几乎不会出现有最小弯曲半径的地方, 所以该实验验证了本研究计算结果满足实际要求。

表1 实验数据(1)

实验条件		试验次数	成功率/(%)
最小半径个数	出口高度/m		
0	4	500	100
1	4	500	100
2	4	500	99.4

另外, 由于密封性问题, 管道接口之间可能存在漏气从而导致气压流失, 在必要的时候要利用储气罐适当增加进气气压, 保证输送气压的同时保证气压稳定。

在上述实验基础上, 本研究取最小半径个数为1, 出口高度取4 m, 进气气压分别按步长  $0.1 \times 10^5 \text{ Pa}$  从理论值  $4.2 \times 10^5 \text{ Pa}$  由高向低变化和按步长  $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  由低向高变化进行实验, 实验数据如表2所示。实验数据表明,

当气源气压小于  $4.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 送钉成功率降低无法满足要求, 气压更低时成功率继续降低, 而当气压升高时均能够保证送钉的成功率。该供钉机构吹钉气缸选用的电磁阀的工作气压范围是0.15 MPa~0.8 MPa, 综上所述, 能够保证送钉成功率的气压范围大约为0.4 MPa~0.8 MPa, 取较合适的工作气压范围为0.5 MPa~0.6 MPa。

表2 实验数据(2)

实验条件	进气气压/Pa	试验次数	成功率/(%)
最小弯曲半径	$5.7 \times 10^5$	500	100
	$5.2 \times 10^5$	500	100
	$4.7 \times 10^5$	500	100
	$4.2 \times 10^5$	500	100
	$4.1 \times 10^5$	500	100
	$4.0 \times 10^5$	500	99.8
	$3.9 \times 10^5$	500	99.4

### 4 结束语

本研究针对自动供钉系统的铆钉气动管道输送过程中的卡钉问题进行了分析研究, 通过对铆钉在管中的受力和运动情况的分析, 计算得出了输钉软管满足输送要求的最小弯曲半径和输气气源的最小值, 并通过实验验证了上述保证铆钉顺利输送的必要条件。

该试验研究给自动送钉实际应用提供了有力的数据参考, 对提高机器人自动钻铆系统自动供钉送钉的成功率和可靠性有着重要的意义。

#### 参考文献(References):

- [1] 民机公司工程技术部. 自动钻铆技术在民机制造中的应用[J]. 成飞科技, 2006(2):27.
- [2] BOOTH R. Agile manufacturing[J]. **Engineering Management Journal**, 1996, 6(2): 105-112.
- [3] 《航空制造工程》编写组. 自动钻铆机的新型供钉系统[J]. 航空维修与工程, 1996(3):27.
- [4] 许国康. 自动钻铆技术及其在数字化装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2005(6):45-49.
- [5] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2005(6):50-52.
- [6] BRANKO S. RIVET FASTENING SYSTEM FOR RADIAL FUSELAGE JOINTS: US, 6098260 [P]. 2000-08-08.
- [7] 刘鹤年. 流体力学[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [8] 李建藩. 气压传动系统动力学[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 1991.

[编辑: 李 辉]