DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2015.0594

# 内窥镜式生命搜救仪的送进机器人设计与分析

# 邱 亚,沈林勇,章亚男,钱晋武,朱 倩

(上海大学机电工程与自动化学院智能机械与系统实验室,上海 200072)

摘 要:针对地震废墟环境,为扩大内窥镜式生命搜救仪的搜救范围,使其能够被送进到狭小的废墟缝隙中, 研制了一种用于废墟搜救的内窥镜式生命搜救仪的送进机器人.首先,对镜体的送进机理以及机器人结构作了详 细的理论分析,然后对分析结果进行了运动学仿真验证,并据此设计出机器人样机.通过多机器人协作,配合前 拉后推的送进方式和头部偏转机构的方向控制,可以逐节渐进式地将柔性内窥镜镜体送进到废墟缝隙中.样机实 验结果表明,该机器人能够平稳有效地完成对柔性内窥镜镜体的送进工作.

关键词:机器人;废墟缝隙;搜索救援;内窥镜;送进机构

中图分类号: TP24 文献标识码: A

坞: A

文章编号: 1002-0446(2015)-05-0594-09

### Design and Analysis of a Feed-in Robot for Endoscope Type Life Search and Rescue Instrument

QIU Ya, SHEN Linyong, ZHANG Ya'nan, QIAN Jinwu, ZHU Qian

(Laboratory of Intelligent Machine and System, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** For ruin environment after earthquake, a feed-in robot for endoscope type life search and rescue instrument is developed to expand the working range of endoscope type life search and rescue instrument and allow it to be sent into the tiny crack in the rubble. The mechanism of the endoscope feed-in method and the structure of the robot are analyzed theoretically in detail, and the analysis results are supported by kinematics simulation. A prototype machine is manufactured. The flexible endoscope can be progressively sent into ruin cracks section-by-section under the cooperation of serval feed-in robots and and the direction control of head deflection mechanism by a pulling-pushing feed-in method. Prototype experiments show that the flexible endoscope can be sent smoothly and efficiently.

Keywords: robot; ruin crack; search and rescue; endoscope; feed-in mechanism

# 1 引言(Introduction)

全球范围的地震灾害不断频发,给当前的现场 救援技术带来了巨大的挑战.尤其是在破坏性地 震发生后,作为专业的地震救援工作者,如何用科 学的救援方法、先进的技术装备去营救幸存者,使 损失降到最低限度,是我们的首要任务.灾难通常 会造成许多建筑物倒塌从而产生巨大危险的废墟. 灾难发生后,迅速采取搜救措施是非常紧迫的,因 为许多人可能会被埋在废墟里,对于被埋的人来 说第1个48小时是最重要的,48小时之后大多数 的幸存者可能会死亡<sup>[1-2]</sup>.但是极端恶劣的现场救 援环境,如频发的余震、狭小的缝隙、危险建筑废 墟,甚至是有毒环境、辐射环境等,将极大地影响 救援的效率和效果,甚至常常威胁救援工作人员的 生命安全.由于灾难废墟现场情况的复杂性,搜救

人员在自身安全得不到保证的情况下很难进入到 现场展开救援工作,许多救援人员会因为在废墟中 搜救而受伤甚至死亡.为了满足灾难废墟救援工作 的需要,国内外很多研究机构都开展了大量的研究 工作,设计开发出在灾难现场的废墟环境中进行搜 救的各类机器人,如美国的 JPL 蛇形机器人、德国 研制的 GMD-snake1 蛇形机器人、加拿大 Inuktu 公 司的 MicroVGTV 多态搜救机器人<sup>[3-5]</sup>. 日本现在还 启动了一个专项研究计划,研制出各种搜索探测机 器人样机<sup>66</sup>. 我国也成立了国家地震灾害救援队, 搜索手段主要有光学探测仪、声波探测仪、红外 探测仪、搜救犬,以及正在探索研发的搜索救援机 器人[7],其中较为成熟的是中国科学院沈阳自动化 研究所李斌教授团队研制的 Amoeba-II 机器人<sup>[8-9]</sup>. 上述研制的搜救机器人多以轮式、履带式或仿生式 为主,为保证在废墟上的驱动能力,设计体积相对

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2013BAK03B01-02); 国家自然科学基金资助项目(90716027).

通信作者: 沈林勇, shenlycn@163.com 收稿/录用/修回: 2015-04-13/2015-06-19/2015-07-23

较大,在功能上也多局限于搜索探测,很难达到救援的目的.

虽然目前先进的生命探测仪和搜救机器人可以 执行部分搜索救援任务,但是它们的使用范围有 很大的局限性, 仅处于废墟表层. 主要原因是地震 废墟中可利用的空间狭小,对于人、搜救犬以及一 般机器人来说无法进入内部进行搜救. 生命探测仪 镜体细小,有着进入缝隙的优势,但由于不能自主 深入而只能在废墟表层探测,因此探测的深度很有 限,使之无法最大限度扩大搜救范围<sup>[10]</sup>.因此,研 制将生命探测仪送进废墟缝隙的机构具有十分重要 的意义.对此,研制了一种用于内窥镜式生命探测 仪的送进机器人,该机器人采用模块化设计,两瓣 对称安装于镜体上. 通过采用特殊的空套式行星轮 结构设计了能自主张开收合的撑盖,在多个机器人 协同工作下,配合渐进的前拉后推式送进方式,完 成对生命搜救仪的送进工作. 文中阐述了前拉后推 式送进机理,对机器人结构及关键机构受力作了理 论分析. 最终通过运动学仿真和实验证明了该送进 机器人方案的可行性.

# 2 渐进式前拉后推的镜体送进机理 (Endoscope feed-in mechanism of the progressive pulling-pushing method)

## 2.1 镜体的结构特点和力学特性

内窥式生命搜救仪是基于内窥镜改进设计而得 到的一种用于生命探测的设备,如图1所示.内窥 镜镜体前端加装集成了多种传感器的多功能探头, 直径30mm,包括图像、声音、红外等传感器,以 达到搜索探测的目的.利用镜体内部空间引入导线 和送气送水软管,可实现一定的救援功能.搜救仪 镜体总长为10m,采用有线通信.为实现对镜体的 送进,首先对其结构特点和力学特性进行分析.



图 1 内窥式生命搜救仪 Fig.1 Endoscope type life search and rescue instrument

内窥镜的镜体结构如图2所示,镜体外圈是聚 氨酯材料组成的外保护套,镜体内圈是螺旋弹簧, 镜体内部还包含有输送流体与气体的软管和用于 传输信号的导线.内圈的螺旋弹簧结构使得镜体 在轴线方向有一定的柔软度,同时在径向有较大的 刚度.这种结构特性使得推拉方式送进镜体成为可 能.但内窥镜镜体的这一结构特点,也使得当镜体 轴向受力达到一定值后,镜体将发生受压弯曲.



根据分析,当镜体没有受压发生过度弯曲时, 推进力可以顺利地沿着本体传递至前端,并克服 摩擦阻力向前送进镜体,而当本体受压发生过度弯 曲时,推进力无法顺利传递至前端,只会增大镜体 的弯曲程度.这种受压弯曲现象是由于弹簧受到压 缩载荷,当超过受压稳定临界力时,内窥镜体出现 失稳现象,镜体将发生屈曲.为避免失稳现象的出 现,必须对镜体的失稳临界载荷与临界受压长度的 关系进行研究<sup>[11]</sup>.

实际情况下,镜体本身并不能保证笔直状态, 总是存在一定弯曲,而且镜体本身受力不只存在轴 向力,还有弯矩的存在.因此,需要考虑镜体受弯 矩情况下的受力变形.

假定弹簧两端作用大小为  $M_0$  的力偶,弹簧整体受力弯曲,圆心角为  $\alpha$  的簧杆截面上的内力有弯 矩  $M_{\alpha 1}$  与  $M_{\alpha 2}$  及扭矩  $T_{\alpha}$ ,这3个力偶两两垂直,如 图 3 所示.



图 3 弹簧截面内力分析图 Fig.3 Internal force analysis of spring section

依据图3所示可得

$$M_{\alpha 1} = M_0 \sin \alpha$$
  

$$M_{\alpha 2} = M_0 \cos \alpha \sin \theta$$
 (1)  

$$T_{\alpha} = M_0 \cos \alpha \cos \theta$$

单圈的应变能为

$$U_{i} = \frac{1}{2EI} \int_{0}^{2\pi R/\cos\theta} (M_{\alpha 1}^{2} + M_{\alpha 2}^{2}) \mathrm{d}s + \frac{1}{2GI_{\mathrm{P}}} \int_{0}^{2\pi R/\cos\theta} T_{\alpha}^{2} \mathrm{d}s$$
(2)

式中*EI*为弹簧的抗弯强度, $I_p$ 为极惯性矩.对于圆 截面的弹簧,有 $I_P = I$ , $G = \frac{E}{2(1+u)}$ .

由此得到整个弹簧的变形能为

$$U = \frac{\pi n R M_0^2}{2EI} \cdot \frac{2 + \mu \cos^2 \theta}{\cos \theta}$$
(3)

式中 n 为弹簧匝数.

得到镜体的弯曲弧度为

$$\theta = \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}M_0} = \frac{2\pi nRM_0}{2EI} \cdot \frac{2 + \mu\cos^2\theta}{\cos\theta} \tag{4}$$

按照纯弯曲梁计算,使用相当弯曲刚度 (*EI*)<sub>eq</sub> 进行计算,有<sup>[12]</sup>:

$$\frac{M_0}{(EI)_{\rm eq}} = \frac{1}{\rho} \tag{5}$$

$$\rho \theta = l_{\rm cr} = 2\pi R n \tan \varphi \tag{6}$$

所以,

$$(EI)_{eq} = M_0 \frac{L}{\theta} = \frac{M_0 2\pi R n \tan \varphi}{\frac{\pi n R M_0}{EI} \cdot \frac{2 + \mu \cos^2 \varphi}{\cos \varphi}} = \frac{2EI \sin \varphi}{2 + \mu \cos^2 \varphi}$$
(7)

式中L为弹簧长度, l<sub>cr</sub>为临界受压长度. 相当弯曲刚度只和弹簧本身有关,代入弹簧参

数计算得: (EI)<sub>eq</sub> = 0.0318.

根据欧拉公式:

$$P = \frac{\pi^2 (EI)_{\rm eq}}{0.5l_{\rm cr}^2} \tag{8}$$

得到镜体弯曲时临界载荷与临界受压长度的关 系,如图4所示.





由此可知,推进力必须小于弯曲临界载荷,才 能保证推进力顺利传到镜体前端,不发生失效;同 时,推进力必须大于摩擦力,才能克服阻力,实现 送进.

镜体实际长度为10m,总摩擦力约为15N,若 靠单一机构送进,则由于受压长度过长,镜体受力 必然超过其弯曲临界载荷,推进力将失效.若单纯 采用前端拉拽方式拉进柔性镜体,则随着拉进长度 增加,由于碰到障碍物有一定弯曲,并且存在摩擦 力,会出现拉拽力 *F*<sub>1</sub> 小于摩擦力 *F*<sub>f</sub> 情况,如图 5 所示,此时拉拽力将会失效.



Fig.5 Pulling failure

因此在自动送进的过程中,本文提出了以分段 渐进式前拉后推的方式送进内窥镜柔性镜体的方 案<sup>[13]</sup>,每段的送进只需克服当前段的摩擦阻力即 可,以保证受压镜体长度不超过临界长度,送进力 不超过弯曲临界载荷,或者在拉进时避免拽力*F*<sub>1</sub>小 于摩擦力*F*<sub>f</sub>,从而实现内窥镜镜体的送进.

参照图 4, 可将镜体分为 15 段实现分段送进, 则每段摩擦阻力为 f = 1 N, 受压长度为 670 mm, 弯曲临界载荷为 P = 2.9 N, 此时,设推进力为 F, 安全系数为 n = 2,则当 F 满足式 (9)时可实现送进镜体.

$$nf \leqslant F \leqslant P \tag{9}$$

### 2.2 渐进式前拉后推镜体送进运动分析

下面以某一段镜体上一组机器人送进为例,对 渐进式前拉后推的送进方式进行分析.

如图 6 所示,一个送进周期可以分为 4 个步骤:

步骤1,机器人2沿镜体爬行,找到外部支撑 位置,撑盖撑开,受到外界阻碍,机器人机体保持 静止,此时机器人2开始产生推进力将镜体送进;

步骤 2,机器人 2 继续推进镜体,将后端镜体 送入缝隙之中,由于受到阻力,两机器人之间的柔 性镜体自身发生弯曲而无法继续被送进; 步骤 3,当机器人 2 无法继续送进镜体时,机器人 1 开始产生推进力将中段镜体送进前端;

步骤 4,镜体前端送进一段距离后,机器人均 收合撑盖,两机器人沿镜体向前爬行,机器人沿镜 体进入更深缝隙,至此,完成一个周期的运动.

之后回到步骤 1,继续送进镜体.利用这种多 节的渐进式前拉后推的送进方式,镜体被逐节送进 到缝隙中.



Fig.6 Feed-in process of the progressive pulling-pushing method

# 3 机器人的结构组成及工作原理(The structure and working principle of the robot)

# 3.1 机器人的结构组成

依据柔性内窥镜镜体的结构特性和渐进式前拉 后推的送进方式,设计了图7所示的送进机器人. 该机器人类似于外管道机器人,总体结构设计的目 标为实现机器人对内窥镜式生命探测仪在狭小的废 墟空间内的送进工作.机器人采用模块化的设计思 路,有利于机器人安装和拆卸更换.机器人由对称 的两瓣相同的模块安装而成,每瓣模块均由驱动机 构、行走机构、支撑机构和机体4个部分组成.

如图 7 所示, 微型直流电机通过电机座固定于 机体右侧, 电机安装有减速器, 提高输出扭矩; 减 速器输出轴与主轴通过一对锥齿轮啮合连接, 驱动 摩擦轮安装在主轴上, 并置于机体的槽中; 主轴左 端安装有行星轮系的太阳轮和不规则行星架, 行星 轮空套在行星架上, 滑块也空套在行星轮的轴上; 两根细长摆杆对称分布在机体两侧, 一端分别与对 应的摆杆座铰接, 另一端均固定在撑盖上.



# 3.2 前拉后推式送进机构的工作原理

机器人的两个对称模块,通过施加预紧力安装 在柔性镜体外圈.机器人的驱动力均由驱动机构中 的微型直流电机提供,电机通过减速器提高输出扭 矩,由锥齿轮将动力传递到主轴上,带动驱动摩擦 轮转动,同时带动行星轮系的转动,以张开或收起 撑盖.

机器人工作主要分为两种状态:推进拉进状态 和前进状态,分别如图 8、9 所示.



锥齿轮 微型直流电机图 9 前进状态Fig.9 Heading state

推进拉进状态: 电机反转, 驱动主轴顺时针方 向转动, 由于驱动摩擦轮与柔性镜体间存在预紧 力, 驱动摩擦轮顺时针转动将驱动机器人沿着镜体 后退, 同时行星轮系中太阳轮也顺时针方向转动, 行星轮由于受力作用, 绕着太阳轮顺时针转动, 通 过滑块将细长摆杆张开, 使支撑盖撑开; 细长摆杆 张开角度则通过不规则行星轮架确定. 当支撑盖受 到外界阻挡时, 机器人无法沿镜体后退, 从而推进 或拉进镜体<sup>[14]</sup>.

前进状态:电机正转,驱动主轴沿逆时针方向 转动,驱动摩擦轮沿逆时针方向转动,使机器人沿 着镜体前行;同时太阳轮逆时针转动,使行星轮绕 太阳轮逆时针转动,细长摆杆收合,支撑盖收紧贴 合于机体.

# 4 机器人设计与参数计算(Robot design and parameters calculation)

# 4.1 行星轮架设计

行星轮系中的行星轮架除了用于支撑空套的行 星轮、传递转动力之外,还需要控制支撑机构收合 和张开状态的位置.设定太阳轮与行星轮的中心 距为 |*OO*'| = 10.5 mm,太阳轮中心与机体面距离为 *L* = 7.6 mm.



图 10 支撑机构收合的极限状态 Fig.10 Supporting mechanism in the limit state of closing

如图 10 所示,支撑机构在收合的极限状态时, 太阳轮继续逆时针转动,空套的行星轮将因行星轮 架无法继续转动,而不能再绕太阳轮逆时针转动, 只能发生自转.行星轮架无法继续转动的原因是底 部与机体接触.因此,行星轮架的底部距主轴孔的 距离应该为 *L*.另外,在收合的极限状态下,应考 虑下次开始张开时的受力情况,由于细长摆杆与行 星轮之间使用的是滑块连接,因此需要避开细长摆 杆处于水平状态的死点位置.假设收合的极限状态 下,细长摆杆仍有一个很小的张开角度存在,从而 行星轮中心需高于太阳轮中心,假设高度为*K*.此 外,行星轮架底部与机体的接触面右端点*M* 需保 证偏左于主轴中心*O*,且*M*点往右的一段行星轮架 边缘轮廓线都应在以*L*为半径、以*O* 为圆心的圆弧 内.满足以上条件,行星轮架转动时才不会与机体 面发生干涉.



图 11 支撑机构张开的极限状态 Fig.11 Supporting mechanism in the limit state of opening

如图 11 所示,支撑机构在张开的极限状态时, 细长摆杆相切于行星轮绕太阳轮的轨迹线.此时, 支撑机构的张角最大,行星轮架右端应接触到机体 面,使行星轮不再绕太阳轮转动.行星轮架转动 γ, 于是有

$$|OP| = \frac{L}{\sin\gamma} \tag{10}$$

又有  $\angle OPQ = \pi/2 - \gamma$ ,利用余弦定理:

$$|OQ| = \sqrt{|OP|^2 + |PQ|^2 - 2|OP||PQ|\cos\angle OPQ}$$
(11)

求得 |OQ| 长度.

### 4.2 支撑机构张开条件分析

支撑机构的驱动力由空套在行星轮架上的行星 轮转动提供,机器人在柔性镜体上的姿态并不确 定,从而支撑机构收合和张开时均可能需要克服 自身重力.为研究行星轮与撑盖机构之间的力学关 系,进行以下分析计算.

如图 12 所示,假定任意时刻,支撑机构的张 角为 *θ*.



图 12 支撑机构任意张开时刻 Fig.12 Supporting mechanism in an open state

通过简化受力图,分别对每个零件单独分析. 细长摆杆受力如图 13 所示.



图 13 摆杆受力简图 Fig.13 Force diagram of oscillating link

假定撑盖受重力或外界力的等效力为 Fn,则有

$$F_{\rm db} \cdot |AO'| = F \cdot |AB| + I_{\rm b} \alpha_{\rm b} \tag{12}$$

其中, $I_b$ 为细长摆杆的转动惯量, $\alpha_b$ 为角加速度,  $F_{db}$ 为受到行星轮的等效作用力, $F = \frac{F_n}{\cos \theta}$ .



图 14 支撑机构受力简图 Fig.14 Force diagram of supporting mechanism

根据图 14,对行星轮分析可得

$$F_{t2} = F_y + F_{bd} \cos(\theta + \beta) + m_d \alpha_d$$
(13)

 $F_{\rm r2} = F_{\rm x} + F_{\rm bd}\sin(\theta + \beta) \tag{14}$ 

$$F_{t2} \cdot r = M_f + I_d \alpha_d \tag{15}$$

式中  $m_d$  为行星轮质量,  $F_{t2}$ 、  $F_{r2}$  分别为行星轮受到 的切向力和径向力,  $F_x$ 、  $F_y$  为行星轮与行星轮架 之间的作用力,  $I_d$ 、  $\alpha_d$  为行星轮转动惯量和角加速 度.



Fig.15 Force diagram of planet carrier

据图 15,对行星轮架分析可得

$$M_{\rm f}' = F_{\rm v}' \left| OO' \right| + I_{\rm c} \alpha_{\rm c} \tag{16}$$

 $I_c$ 、 $\alpha_c$ 分别为行星轮架的转动惯量及角速度.

根据牛顿第三定律,并将式 (16) 代入式 (13), 于是有

$$F_{t2} = \frac{M_{f} - I_{c}\alpha_{c}}{|OO'|} + F_{bd}\cos(\theta + \beta) + m_{d}\alpha_{d} \qquad (17)$$

其中 $M_f = F_{t2}r$ ,r为行星轮分度圆半径.于是:

$$F_{\rm bd} = \frac{F_{\rm t2}(1 - \frac{r}{|OO'|}) - m_{\rm d}\alpha_{\rm d} + I_{\rm c}\alpha_{\rm c}}{\cos(\theta + \beta)}$$
(18)

那么,

$$F \cdot |AB| = \frac{F_{t2}(1 - \frac{r}{|OO'|}) - m_{d}\alpha_{d} + I_{c}\alpha_{c}}{\cos(\theta + \beta)} \cdot |AO'| - I_{b}\alpha_{b}$$
(19)

将 
$$M_{\rm f} = F_{t2}r$$
 代入,于是有  

$$F_{\rm n} = \frac{\left[M_{\rm f}(1 - \frac{r}{|OO'|}) - m_{\rm d}\alpha_{\rm d} + I_{\rm c}\alpha_{\rm c}\right]\cos\theta}{r\cos(\theta + \beta)} \cdot \frac{|AO'|}{|AB|} - \frac{I_{\rm b}\alpha_{\rm b}\cos\theta}{|AB|}$$
(20)

因为机构运行的速度很慢,角加速度非常小, 影响几乎可忽略不计.因此得到简化后的公式:

$$F_{\rm n} = \frac{M_{\rm f} (1 - \frac{r}{|OO'|}) \cos \theta}{r \cos(\theta + \beta)} \cdot \frac{|AO'|}{|AB|}$$
(21)

行星轮与行星轮架之间的配合关系以及摩擦系数已知,所以存在一个最大的 *M*<sub>f</sub>.由等式 (21) 可知,随着 *F*<sub>n</sub>增大,在 *M*<sub>f</sub>达到最大值之前,等式一直成立.由于机器人能够移动避开外界障碍,因此 仅需克服重力来张开撑盖.

# 5 仿真与实验(Simulation and experiment)

### 5.1 Adams 仿真分析

使用 SolidWorks 2012 建立 3 维模型. 如图 16 所示,将建立好的 3 维模型导入到 Adams 进行运动 学仿真.

机器人的运动平顺性很大程度上影响机器人运动性能以及稳定性.送进机构采用纯滚动摩擦沿镜体爬行与镜体送进.以一种普通微型减速电机为例,转速为14r/min,防止启动冲击过大,旋转马达使用 STEP 函数,从0~1.5s 平滑加速至额定转速.分别使送进机构沿镜体爬行 20s,送进镜体20s,得到机器人和镜体的速度曲线,如图 17、18 所示.



Fig.18 20 s feed-in simulation

可以看出,送进机构沿镜体爬行以及对镜体的 送进速度都较平稳,基本与理论速度一致:

$$\upsilon = 2\pi R_{\rm d} \frac{n}{60} \tag{22}$$

其中:n为驱动电机转速, $R_d$ 为驱动摩擦轮等效半径.

从图中可以发现,周期性的速度波动基本在 0.5 mm/s 以内,在设计范围内.经过多次仿真,发 现速度周期性波动与齿轮啮合频率相当,推断主要 原因为锥齿轮啮合冲击产生,在保证齿轮齿满足强 度要求的情况下,可考虑适当增加齿轮齿数进一步 降低速度波动范围.

前面对支撑机构的张开条件做了理论分析,为 模拟撑盖自身重力及外界阻力,对撑盖施加已知外 力 Fn. 为保证顺利张开撑盖,该力与行星轮摩擦扭 矩 M<sub>f</sub> 必须满足等式 (21). 假定支撑机构初始为收 合状态,受到等效外力 $F_n$ 为3N,代入计算则 $M_f$ 应大于 143.4 N·mm.

行星轮与行星轮架间摩擦扭矩 M<sub>f</sub> 无法直接获 取,在此检测作用于太阳轮上旋转马达的马达转矩 (T), 有如下关系:

式中, R 为太阳轮分度圆半径.

通过计算得到 T 在大于 191.2 N·mm 时,支撑 机构达到张开条件.

为减小齿轮间啮合冲击,对作用在太阳轮上的 旋转马达使用 STEP 函数,从 0~1.5 s 平滑加速至 额定转速;为减小零部件间碰撞引起冲击,模拟外 力 $F_n$ 也使用 STEP 函数,从0~1.5 s 平滑加载荷至 3N. 为模拟  $M_{\rm f}$ ,使用 STEP 函数从 0.5 s ~ 6 s 在行 星轮和行星轮架间施加一定压力,并设定接触,摩 擦设置为 $\mu_k = 0.20$ 、 $\mu_s = 0.25$ . 仿真时间8s,得到 图 19 曲线.



(23)

Fig.19 Curve of cover height and simulated torque

齿轮间存在周期性啮合冲击,因此仿真中马达 转矩曲线发生明显抖动,但不影响对曲线关系的分 析. 在0s时,撑盖受力为0,太阳轮的瞬间启动扭 矩使撑盖发生一次抖动,这在后面的实验中也有体 现. 1.5s后,太阳轮转速和模拟外力都达到稳定状 态,随着马达转矩的增加,5.2s时,马达转矩达到 188 N·mm, 等效 *M*<sub>f</sub> 为 141 N·mm 时支撑机构开始 张开,由于行星轮开始与行星轮架一起转动,马达 转矩迅速下降. 6s 时支撑机构完全撑开, 施加外力 达到稳定,此后马达转矩只克服摩擦扭矩 M<sub>f</sub>,虽然 齿轮产生周期性抖动,但平均值基本不发生变化.





Fig.20 The theoretical calculation curve and simulation curve

如图 20, 经过多次仿真, 发现理论计算与模 拟得到的外力 F<sub>n</sub> 与摩擦扭矩 M<sub>f</sub> 的关系曲线几乎完 全重合,验证了理论计算的可行性.由此可知,提 高行星轮受到的摩擦扭矩,可以提高支撑机构克服 外力的能力,且通过理论计算可以得到一个具体关 系.此外,设计的硬铝材料撑盖的质量只有14.3g, 按理论计算,行星轮受到的摩擦扭矩能完全克服撑 盖重力,张开撑盖.

### 5.2 实验过程

前拉后推式内窥镜镜体送进机器人样机如图 21 所示,机器人样机主要参数如下:机器人送进镜体 直径 12 mm, 轴向长度 130 mm, 外径 60 mm, 质量 0.51 kg, 电机功率 5 W, 设计运行速度 8 mm/s.



图 21 送进机器人样机 Fig.21 Model of the feed-in robot

在实验中,送进的柔性镜体采用的是内窥镜镜体,镜体外部材料为聚氨酯,实际废墟搜救机器人 使用的柔性镜体外部材料为钢丝网.实验用的柔性 镜体的摩擦系数相对要小一些,因此若实验可行, 则实际运行将更具可靠性.

如图 22 所示,针对废墟搜救机器人在废墟中 可能遇到的障碍进行了爬坡和转弯实验.实验中, 使用砖块模拟废墟环境,设计有转弯窄缝以及斜坡 障碍.通过两个送进机器人模拟前拉后推式送进方 式,分别测试单次送进长度、最小转弯半径和爬坡 角度,以有效通过为合格标准进行记录.



图 22 爬坡与转弯实验 Fig.22 Climbing and turning experiment

经过实验的验证,渐进式前拉后推式柔性镜体 送进机器人,撑盖能顺利张开与收合,能够实现废 墟内的送进工作,单次送进长度约为 0.5 m. 在转 弯内角小于 90° 的急弯实验中还存在不稳定情况, 符合文中对镜体送进的力学分析,即达到了弯曲临 界载荷. 但爬坡角度小于 40°,说明在克服重力和 粗糙面的摩擦阻力方面,还需要进一步改进.

# 6 结论(Conclusion)

本文主要研究的是基于内窥镜式生命搜救仪和 前拉后推的特殊送进方式设计的一种送进机器人. 设计的内窥镜式生命搜救仪的送进机器人结构小 巧,性能稳定,能在废墟中恶劣的环境下工作.在 镜体送进的过程中,通过多个送进机器人配合,以 前拉后推方式,渐进式逐节送进,重点解决了一般 推进方式在废墟缝隙环境下的送进深度不足的问 题.目前已经开始对机器人送进能力、供电方式、 操控技术和多机器人联合等方面做进一步研究,以 完善整套送进系统作业能力,为给救灾工作提供技 术支持和搜救机器人的深入研究奠定基础.

### 参考文献(References)

[1] 王忠民. 灾难搜救机器人研究现状与发展趋势[J]. 现代电子技术, 2007, 30(17): 152-155.

Wang Z M. Research status and development tendency of searching and rescuing robot[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30(17): 152-155.

[2] 钱善华, 葛世荣, 王永胜, 等. 救灾机器人的研究现状与

煤矿救灾的应用[J]. 机器人, 2006, 28(3): 350-354.

Qian S H, Ge S R, Wang Y S, et al. Research status of the disaster rescue robot and its applications to the mine rescue[J]. Robot, 2006, 28(3): 350-354.

- [3] 张涛,尚红,徐建华,等. 机器人技术在地震废墟搜索救援中的应用[J]. 自然灾害学报,2012,21(5): 108-112.
   Zhang T, Shang H, Xu J H, et al. Application of robot tech-
- nology in search and rescue in earthquake ruins[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(5): 108-112.[4] Gyoda K, Hada Y, Takizawa O. Performance analysis of the net-
- (4) Gyoda K, Hada I, Jakizawa O. Performance analysis of the network models for the search robot rescue system in the closed spaces[C]//IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 1-6.
- [5] Ulu C, El-Kahlout Y, Hancioglu I, et al. Design of an inspection robot for search and rescue operations in mines[C]//23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey. Turkey: Chamber of Mining Engineers of Turkey, 2013: 1913-1921.
- [6] Matsuno F, Tadokoro S. Rescue robots and systems in Japan [C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 12-20.
- [7] 王楠,吴成东,王明辉,等.可变形灾难救援机器人控制站系统的设计与实现[J].机器人,2011,33(2):202-207.
  Wang N, Wu C D, Wang M H, et al. Design and implementation of the control station system of a shape-shifting search and rescue robot[J]. Robot, 2011, 33(2): 202-207.
- [8] Ye C L, Ma S G, Li B. Research on urban search and rescue robot: Development of amoeba II[C]//6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 9183-9187.
- [9] 李斌. 蛇形机器人的研究及在灾难救援中的应用[J]. 机器 人技术与应用, 2003(3): 22-26.

Li B. Research and application in disaster relief of the snake-like robot[J]. Robot Technique and Application, 2003(3): 22-26.

[10] 吴德清. 音视频生命探测仪,中国: CN301565047S[P]. 2011-06-01.

Wu D Q. Audio and video life detector, China: CN301565047S [P]. 2011-06-01.

- [11] 陈文森,陈化.密圈螺旋弹簧的变形分析[J].力学与实践, 1984, 6(6): 49-50.
  Chen W M, Chen H. Deformation analysis on the closed coiled helical spring[J]. Mechanics and Engineering, 1984, 6(6): 49-50.
- [12] Gere J M, Timoshenko S P. Mechanics of materials[M]. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- [13] 徐草,章亚男,沈林勇,等.废墟狭缝搜救机器人自动送 进系统研究[J]. 机电工程,2010,27(11):110-114.
  Xu C, Zhang Y N, Shen L Y, et al. Automatic insertion system for a searching and rescuing robot in ruins[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(11):110-114.
- [14] 徐辅仁,沈伟. 摩擦力对摩擦轮表面接触强度之影响[J]. 机床与液压,2001(5): 98-99.

Xu F R, Shen W. Effects of friction on surface contact strength of friction wheel[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2001(5): 98-99.

# 作者简介:

邱 亚 (1990-),男,硕士生.研究领域:自动化机械设 计,机器人设计及控制.