

直流道消防炮的开发设计与实验

方 菲¹, 刘平安²

(1. 吉林省畜牧业学校, 吉林 白城, 137000; 2. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 流体流经弯曲管道时的管流水头损失是影响弯曲流道消防炮效率或射程的主要因素之一。在流体动力学理论分析基础上, 利用直型流道代替弯曲流道技术, 介绍了一种两自由度混联结构消防炮的开发设计。实验结果证明, 设计达到了预期目标, 对大射程、高效率、低能耗消防炮的开发研究具有指导意义。

关键词: 消防炮; 直流道; 机构优化设计; 样机实验

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Development Design and Test of Fire Monitor with Straight Flow Channel

Fang Fei¹, Liu Pingan²

(1. Jilin Stockbreeding School, Baicheng 137000, China; 2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The head losses in pipe flow when fluid goes through bend flow channel is one of the main factors leading to serial mechanism fire-monitors' pressure drop and short-distance jet. The design of a fire-monitor with 2-degree freedom compound mechanism, which realizes the substitution of the traditional bend flow channel (BFC) with a straight one (SFC) based on the analysis of fluid dynamics theory, is presented in this paper. The expected results of the work were achieved based on the experimental results, which has guidance for the redevelopment of novel fire-monitor with longer distance, higher efficiency and lower energy consumption than traditional ones.

Key words: fire monitor; straight flow channel; mechanism optimal design; performance test

消防炮是通过赋予喷管内的灭火介质(如水、泡沫或气雾)一定动能以获得一定初速度,使其喷射至着火点,以达到灭火效果的常用消防装置。由于它能远距离作业,使消防人员免受热辐射、有毒浓烟、甚至爆炸的危害,且具有操作简单、安全、灭

火效率较高、威力大的优势,在移动消防车、消防船或可能发生严重火灾场所,如石化车间、码头、仓库等场合得到广泛运用^[1-3]。为了使喷头能对准灭火目标或在一定范围内扫射,通常需要两个转动自由度,即竖直面内和水平面内的往复摆动。同时为了

操作人员能安全并高效完成灭火任务,还对射程(喷射距离)和扬程有一定要求,这对于目前高楼林立的城市消防显得尤为重要。射程和扬程主要取决于介质喷出时的压力、流量,以及喷嘴形状和尺寸^[4-5],以及工作环境如风力风向等因素。在环境和媒介输入压力一定的条件下,媒介流经炮管的压力损失决定了其出口压力,所以减少炮内流道压力损失是提高消防炮工作效率、减少能耗的有效途径。目前国内普遍采用的消防炮如图1所示^[6-8],主要由进口联接附件、炮体、喷管等部分组成。炮体由若干节管道通过串联方式连接,利用人工(或电机)驱动,经蜗轮蜗杆传动实现炮管在上下和水平两个面内的摆动。



图1 传统串联消防炮
Fig.1 Traditional fire monitor

这种串接结构型式的消防炮由于流道存在直角弯曲,对流体动能形成较大损耗即水头损失(单位重量的能量损耗,用长度单位m表示),直接影响了射程或扬程,降低了灭火效率,导致消防炮性能和适用范围受到了一定限制。

首先根据流体动力学理论,分析比较两种消防炮的管流水头损失情况;然后利用混联机构代替串联结构,用直管流道代替弯曲流道,实现消防炮炮管的两个自由度运动,机构设计包含选型,尺寸优化和整体结构设计;最后制作出样机并经过性能测试,验证其有效性。

1 消防炮流道水头损失的流体动力学基础

根据流体动力学理论^[9],消防介质流经流道时的总水头损失 h_w 主要由流经直管时的沿程水头损失 h_f 和流经弯头的局部水头损失 h_l 的总和。

$$h_w = \sum h_f + \sum h_l \quad (1)$$

按照圆管湍流计算理论,直管沿程水头损失 h_f 和直角圆弧过渡管流局部损失 h_l 分别为

$$\begin{cases} h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} \\ h_l = \zeta \frac{V^2}{2g} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda=64/R_e$ 为沿程损失系数, R_e 为流体雷诺数; l 为直管段长度,m; d 为管径,m; V 为流断面平均速度,m/s; g 为重力加速度,m/s²; ζ 为局部损失系数,对于直角圆弧过渡管道,且圆弧半径等于管径的管道有 $\zeta=0.29$ 。

假定弯曲流道各直管段总长度等于直管流道长度(一般前者比后者要大一些),且材料、工艺和表面质量,以及直径等尺寸均相同,则如图1所示单个直角圆弧过渡的流道与直型流道的总水头损失之比为

$$\eta = \frac{h_l}{h_f} = \frac{\zeta}{\lambda} \frac{d}{L} \quad (3)$$

取 $\zeta=0.29$,平均流速 $V=5$ m/s,水的动力粘度 $\mu=10^{-6}$ m²/s, $d=35$ mm, $L=360$ mm,则 $R_e=\rho Vd/\mu=175\ 000$, $\lambda=64/R_e=0.000\ 365\ 7$,代入式(3)得 $\eta=79.3$ 。

对于如图1所示有4个直角圆弧过渡的弯曲流道的串联炮,因为弯曲造成的水头损失将比直管炮增加水头损失约320倍。而且随着流速加大, η 值越大,损失越大。

为了解决现有串联消防炮弯曲流道带来的能量损失,本文摒弃传统串联机构,改用其它机构型式,设计出直管流道消防炮,降低流道能耗,以提高射程和扬程,从而达到提高灭火效率的目的。

2 机构选型

传统消防炮采用串联机构,通过蜗轮蜗杆实现水平和竖直两个方向的摆动,形成多个直角弯道,增大了消防介质流经流道的压力损失和湍流强度。将直管流道代替弯管流道后,可以选用其它型式机构来满足消防炮运动要求^[10-14]。从机构型式方面考虑,实现两个转动自由度可以通过串联、并联或串并联即混联机构来实现水平摆动和上下俯仰动作。虽然两转动自由度并联机构型式^[12-15]不少,但因为运动耦合,设计和分析较复杂,工作空间小,运动灵活性欠佳,控制也比较困难等不足,经过比较筛选,

最后选用平面四杆机构与摆杆机构组合实现炮管平台上下摆动,再在平台与炮管之间通过回转副连接实现炮头摆动的混联传动方式。如图 2 所示两自由度机构运动简图。图 2 中为俯仰角,摇杆 DC 为摆动平台,在其上通过一个转动副连接炮管,实现在平台上往复摆动。

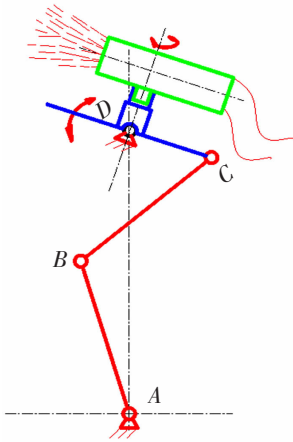


图 2 两自由度机构
Fig.2 2-DOF mechanism

3 机构设计

3.1 运动分析

如图 2 所示,将平台 CD 与机架相连,通过原动件 AB 的摆动驱动其作上下俯仰运动,可选用双摇杆机构完成。炮管在平台上的往复摆动通过两者的转动副实现。

按典型口径为 $\Phi 65$ mm 消防炮设计该机构,具体设计要求如图 3 所示, CD 杆的摆动角度满足要求为 $\theta_2 = -15^\circ \sim +60^\circ$,并且在考虑人机工程等方面原因,可选定消防炮的整体高度为 l_{AD} ,以及输出平台

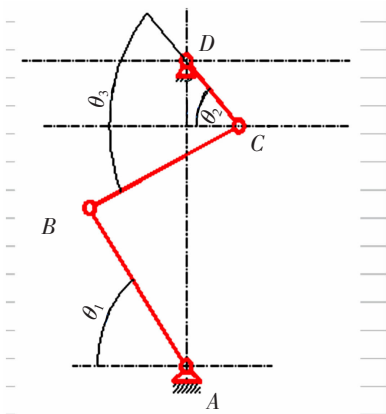


图 3 四杆机构简图

Fig.3 Schematic diagram of 4-bar linkage

的长度为 $2 l_{CD}$ 。求 l_{AB} 和 l_{BC} 的大小。

由分析知:由图 3 中杆 AB 的驱动可用摆杆机构实现。譬如可通过蜗轮连续转动实现杆 AB 的往复摆动。考虑到蜗轮蜗杆的中心距和安装方便以及避免构件干涉,杆 AB 的摆角 θ_1 应尽可能大,以便于控制。同时为确保机构具有良好的传动性能,使传动角 $\theta_3 \geq 40^\circ$ 。令

$$\begin{cases} -10^\circ \leq \theta_2 \leq 50^\circ \\ 30^\circ \leq \theta_1 \leq 150^\circ \\ 40^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

由图 3 中几何关系有

$$l_{AD} = l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BC} \sin(\theta_3 - \theta_2) + l_{CD} \sin \theta_2 \quad (5)$$

令 $\theta_1 = 30^\circ$ 时,有 $\theta_2 = 60^\circ, \theta_3 = 90^\circ$; $\theta_1 = 90^\circ$ 时,有 $\theta_2 = -10^\circ, \theta_3 = 40^\circ$; 分别代入式(5)中便可得到 l_{AB} 和 l_{BC} 的值。

3.2 四杆机构优化设计建模

机构优化设计就是为满足给定的运动学要求,在约束条件的限制范围内,按照某种设计准则即目标函数,改变设计变量,寻求最佳方案^[5]。

对于俯仰机构,在满足运动要求的情况下,以机构整体高度尺寸最小为目标函数,运动范围和实际工作要求为约束进行尺寸优化。这里就是要求 l_{AD} 的最小值,由图 3 中的几何关系和式(4)可直接写出目标函数和约束条件如下

$$\begin{aligned} \min F(x) &= l_{AD} = l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BC} \sin(\theta_3 - \theta_2) + l_{CD} \sin \theta_2 \\ \text{s.t.} & \begin{cases} g_1(x) = \theta_1 - 90^\circ \leq 0 \\ g_2(x) = 30^\circ - \theta_1 \leq 0 \\ g_3(x) = \theta_2 - 60^\circ \leq 0 \\ g_4(x) = -10^\circ - \theta_2 \leq 0 \\ g_5(x) = \theta_3 - 90^\circ \leq 0 \\ g_6(x) = 40^\circ - \theta_3 \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

以上优化模型属于单目标多约束优化问题,采用工程计算软件 Matlab^[6]的优化设计工具箱很容易求得满足要求的解。

3.3 设计实例

初选 $l_{AD} = 490$ mm, $l_{CD} = 145$ mm,由式(5)得 $l_{AB} = 254$ mm, $l_{BC} = 351$ mm,为双摇杆机构。根据式(5)和式(6)利用 Matlab 最大最小逼近函数,可得如图 4 所示优化结果。

如图 4 所示,横坐标为迭代次数,纵坐标为每次迭代求出的值。由图中可以看出经过 50 次迭代后,结果趋于收敛。得到消防炮最低高度为 348 mm。

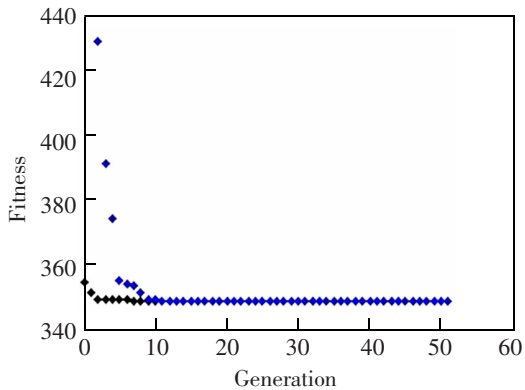


图 4 最小值

Fig.4 Minimum value

同样可以利用该优化工具箱求出 l_{AD} 在约束条件下的最大值,经过近 80 次迭代后 l_{AD} 收敛于 633 mm。

由以上优化结果知: l_{AD} 的取值范围为(348,633);综合考虑安装和操作方面等因素可取 $l_{AD}=500$ mm。将 l_{AD} 和 l_{CD} 的值代入式(5)中得到四杆机构尺寸: $l_{AB}=276$ mm, $l_{BC}=272$ mm, $l_{CD}=145$, $l_{AD}=500$ mm。

3.4 摆动机构的设计

为了简化结构,用滚子代替滑块在摆杆 AB 槽中滑动实现将蜗轮的整周转动变换为摆杆的往复摆动,如图 5 所示。

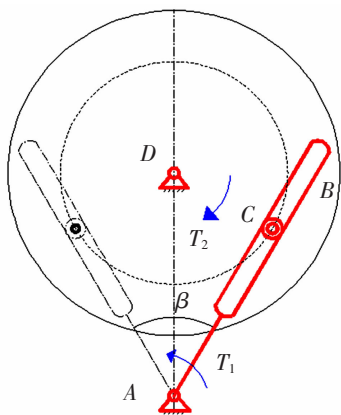


图 5 从整周转动到往复摆动的变换

Fig.5 Transformation from revolution to rock

如图 6 所示:杆 CD 的两个极限位置 C_1D 、 C_2D 即为炮头俯仰的极限位置。不难找到 B 的两个对应位置 B_1 、 B_2 ,再作 $\angle B_1AB_2$ 的角平分线 AE,则蜗轮的转动中心在线 AE 上。

如图 6,蜗轮上圆柱滚子中心距蜗轮中心设为 R ,显然要求

$$R < \frac{d_2}{2} \tag{7}$$

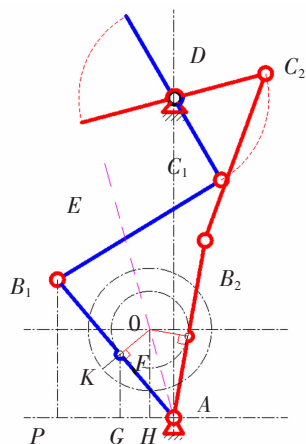


图 6 摆杆机构设计

Fig.6 Design of oscillating mechanism

式中 d_2 为蜗轮齿根圆半径。蜗轮中心 O 离摆动中心 A 的距离

$$l_{OA} > a + \frac{d_{a1}}{2} \tag{8}$$

式中: a 为蜗轮蜗杆中心距,mm; d_{a1} 为蜗杆齿顶圆直径,mm。

为保障良好的受力性能,圆柱滚子在最低位置时离摆杆摆动中心 A 点距离不能太小,要求

$$l_{OA} - R > \frac{1}{3} l_{AB} \sin \angle PHB_1 \quad (i=1,2) \tag{9}$$

由上述关系式选蜗轮蜗杆参数如表 1^[18]。

将 $l_{AB}=276$ mm 及相关参数代入式(7)~式(9)中得摆动机构尺寸为

$$l_{OF}=47 \text{ mm}, l_{OA}=177 \text{ mm} \tag{10}$$

采用相同尺寸参数的蜗轮蜗杆传动实现炮管在平台 CD 上的往复摆动。

4 样机制作与实验

4.1 样机制作

根据以上分析与计算,设计出的样机如图 7 所示,包含机械和控制 2 部分。主要技术参数如表 1 所示。

表 1 消防炮设计参数

Tab.1 Parameters of fire monitor design

Rated flow /s	Nominal voltage/MPa	Jet distance/m	Angle of pitch	Horizontal turn angle
50	≤1.0	≥65	-10°~60°	0~180°



图7 基于混联结构的消防炮样机

Fig.7 Prototype of fire monitor based on serial-parallel mechanism

采用两个 86 型混合式步进电机分别驱动上下两套蜗轮蜗杆传动机构,实现炮管的水平和俯仰摆动。

4.2 控制系统

控制装置内置微控制器和驱动电路^[7],具备手动和自动两种工作模式,并可以扩展远程遥控模式,具有手动急停功能。选择 220 V/48 V 10 A 开关电源,电源电流容量应不小于 8.6 A,输出功率 480 W。微控制器采用 STC 工业控制芯片 STC12C5A60,具备抗强电磁干扰特性,其工作原理如图 8 所示。

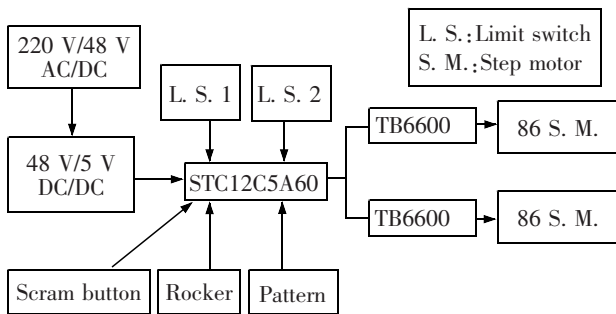


图8 控制框图

Fig.8 Control block diagram

控制装置上电后,由模式选择,在手动模式下,当摇杆上被检测压下,微型控制器将以一定频率发送脉冲并确定电机动作速度;当摇杆下被检测,微控制器仍然发送该频率,但是方向值取反,以此类推,实现对上下、左右 4 个方向的运动控制;当运行在自动模式下,电机自动运行,当碰触限位 1、限位 2 后实现自动反转,从而实现往复运动;当急停压

下,电机脉冲被隔离,电机自动半流保持锁定,由于机械部分采用蜗轮蜗杆传动,也具备机械自锁能力。实验证明系统达到控制目标。

4.3 样机测试

喷射流体的轨迹和射程除受流体出口压力、口径和初速度等参数影响外,还有工作环境如气温、气压、风向和风速等相关^[8]。实验测试为在一定压力下的最远射程测试,并与传统弯管炮同等条件下的射程比较。图 9 为现场实验测试,实验是在正常标准大气压和室外无风工作环境下进行的。喷头出口直径为 $\Phi 28\text{ mm}$ ^[5,19](喷管从进口到出口带有一定锥度),仰角约为 30° 时在 0.5~0.8 MPa 压力下的直管炮射程值 s_1 ,不同压力下直管炮与弯管炮射程比较如表 3。

通过实验发现,在压力较小时其射程增量并不明显,随着压力增加其增量也越来越大,到 0.8 MPa 时,与某企业提供的弯管炮射程 s_2 相比较,其射程增量已接近 12%,故通过样机实验可知与传统炮射程比较具有明显的优势。

表 2 不同压力下直管炮与弯管炮射程比较

Tab.2 Comparison of jet distances of novel fire monitor to traditional one with different pressure

Pressure MPa	s_1/m	s_2/m	Range increment/%
0.5	32	30	6.67
0.6	47	43	9.3
0.7	61	55	10.91
0.8	75	67	11.94

5 结语

1) 通过蜗轮蜗杆驱动摆杆机构,经摆杆驱动双摇杆机构,并在输出摇杆上串联一个转动副的混合机构方式,实现喷管的两个垂直平面内的转动,从而达到用直管流道代替弯管流道的目的消防炮,可有效减小水头损失,减少能耗,增大射程,提高灭火效率。

2) 从直管和弯管消防炮流道水头损失比较分析入手,设计了满足消防炮运动要求的新型消防炮机构,包括俯仰机构尺寸优化与结构设计,用滚子与摆杆上槽的高副接触代替摆动导杆机构的摆块,从而简化了结构。最后制作出了样机,并经现场性能测试,设计达到了预期目标。

参考文献:

- [1] 魏青. 关于消防特种车辆装备技术管理的相关探讨[J]. 绿色环保建材, 2021(12):177-178.
WEI Q. Research of technology management on special vehicles or equipment of fire department[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2021(12):177-178.
- [2] 苏心伟. 大型商业综合体灭火对策救援研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(3):183-186.
SU X W. Study on fire-fighting and rescue countermeasures of the large-scale commercial[J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(3):183-186.
- [3] 黄海来. 新型智能消防小车的研究与实现[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3):127-133.
HUANG H L. Design and implementation of new intelligent firefighting car[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(3):127-133.
- [4] 周文会. 高压水射流喷嘴内外流场的数值模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2008.
ZHOU W H. Numerical and simulation research on the high pressure water jet nozzle in inside and outside efflux flow field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [5] 刘平安, 廖小东, 程雯玉, 等. 基于 Fluent 的消防炮流线型喷嘴高度设计[J]. 机床与液压, 2015, 43(1):99-102.
LIU P A, LIAO X D, CHENG W Y, et al. Design of streamline nozzle height of fire monitor based on fluent[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(1):99-102.
- [6] 章福昌. 我国 21 世纪消防的发展研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
ZHANG F C. Scientific research on fire-fighting of china in the 21 th century[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [7] 刘慧, 王春丽, 米海蓉, 等. 固定式消防水炮在大空间建筑中的应用[J]. 给水排水, 2005, 31(10):72-74.
LIU H, WANG C L, MI H R, et al. Applications of fixed fire monitor in large-volume building[J]. Water & wastewater Engineering, 2005, 31(10):72-74.
- [8] 刘德民, 刘小兵, 王靖, 等. WSTSKP 数控消防炮的结构与流场分析[J]. 消防科学与技术, 2007, 26(4):430-432.
LIU D M, LIU X B, WANG J, et al. Analysis of structure and fluent field on WSTSKP numeric-control fire monitor [J]. Fire Science & Technology, 2007, 26(4):430-432.
- [9] 杨建国, 张兆营, 鞠晓丽, 等. 工程流体力学[M]. 北京:北京大学出版社, 2010.
YANG J G, ZHANG Z Y, JU X L, et al. Engineering fluid dynamics[M]. Beijing: Peking University Press, 2010.
- [10] 王铨. 基于并联结构的消防炮设计与开发[D]. 南昌:华东交通大学, 2014.
WANG Q. Design and development of fire monitor based on parallel structure[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014.
- [11] 廖小东. 消防炮机构设计与水力学性能分析[D]. 南昌:华东交通大学, 2014.
LIAO X D. Mechanism design and hydraulic performance analysis of fire monitor[M]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014.
- [12] ZHENG H, LI Q C. General methodology for type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2):131-145.
- [13] 刘平安, 魏创锋. 利用约束螺旋理论综合的空间对称 2-DOF 并联机构[J]. 中国机械工程, 2014, 25(18):2506-2510.
LIU P A, HUAI C F. Synthesis of spatial symmetrical 2-DOF parallel mechanism with constraint screw theory [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(18):2506-2510.
- [14] 刘平安, 胡长锋. 一种 2 转动自由度空间机构[J]. 机床与液压 2015, 43(15):36-40.
LIU P A, HU C F. A 2 rotational degree of freedom spatial parallel mechanism[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(15):36-40.
- [15] 孙靖民. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
SON J M. Mechanical optimal design[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1999.
- [16] 王沫然. MATLAB 与科学计算[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
WANG M R. MATLAB and scientific calculation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [17] 魏晓艳. 微控制器技术与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2013.
WEI X Y. Technology & application of micro-controller [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [18] RYAN M J. CFD prediction of the trajectory of a Liquid Jet in a Non-uniform air crossflow[J]. Computers & Fluids, 2006, 35(5):463-476.
- [19] 俞毓敏. 大射程水炮设计及研究[D]. 南京:南京理工大学, 2011.
YU Y M. Design & study on long-distance jet-flow device [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.



第一作者:方菲(1968—),女,讲师,研究方向为机械设计及理论,机构优化设计。E-mail:270379715@qq.com。



通信作者:刘平安(1962—),男,教授,研究方向为机械设计及理论,机器人机械设计。E-mail:281127402@qq.com。