

动能橡胶圆球弹优化选择及外弹道仿真

刘小华, 郭三学, 罗忠新, 朱光涛

(武警工程大学 装备工程学院, 西安 710086)

摘要: 为了为某型动能防暴发射器选择最优橡胶弹丸, 建立了橡胶圆球弹外弹道模型, 从国内外典型橡胶圆球弹的大小、空气阻力对弹道的影响和终点效应三方面分析了对橡胶圆球弹选择的影响, 利用 MATLAB 仿真软件计算了 8 mm、10 mm、15 mm 3 种直径不同质量条件下的空气阻力对弹道的影响、最大射程、终点速度、飞行时间、动能和比动能; 重点分析比动能和 K 值对弹道特性及终点效应的影响, 通过分析和比较, 得出了直径为 10 mm, 质量为 2 g 的橡胶圆球弹最适合作为某型动能防暴发射器的战斗弹丸; 通过分析直径 10 mm, 质量 2 g 的橡胶圆球弹不同发射角度情况下的弹道特性和终点效应, 结果表明, 该橡胶圆球弹存速能力强, 发射距离远, 安全性高, 为某型动能防暴发射器的弹丸制造提供了理论支撑。

关键词: 橡胶圆球弹; 优化选择; 弹道仿真; 终点效应

Optimized Selection and Trajectory Simulation of Rubber Ball Projectile with Kinetic Energy

Liu Xiaohua, Guo Sanxue, Luo Zhongxin, Zhu Guangtao

(College of Equipment Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: In order to select the optimal rubber bullets for a certain type of anti-riot disperser of kinetic energy, trajectory model of rubber ball is established; three factors affecting the choice of rubber ball projectile which are the influence of air resistance on trajectory, the size of domestic and foreign typical rubber bullets and terminal effect are analyzed. Using MATLAB simulation software to analyze the influence of air resistance on trajectory, the farthest range, flight time, kinetic energy and specific kinetic energy of 8 mm, 10 mm, 15 mm three kinds of different diameter and quality of rubber ball, the effects of specific kinetic energy and K value on ballistic characteristics and terminal effect are analyzed importantly; By analyzing and comparing, the diameter of 10 mm and the mass of 2 grams is the most suitable for a certain type of anti-riot disperser. Through analyzing the ballistic characteristics and end effect on the rubber bullets which diameter is 10 mm and the mass is 2 grams, under different emission angle, the results show that it has the ability to keep speed and have the characteristic of remote operational distance, high safety, providing theoretical support for the manufacture of a certain type of anti-riot disperser of kinetic energy.

Keywords: rubber bullets; optimized selection; trajectory simulation; terminal effect

0 引言

动能橡胶圆球弹是采用密度较小的柔性材料橡胶作为载体, 以冲击的动能打击有生目标, 使目标产生强烈的疼痛感, 从而失去抵抗能力, 但不致命的一种非致命动能弹^[1]。主要用于执行人群驱散、阻止犯罪分子冲击重要警卫目标、反恐等任务中。

本文以某型动能防暴发射器选择为基础, 选择多大直径和多重的橡胶球是动能防暴发射器总统设计的重要内容之一, 首先建立了橡胶圆球弹的弹道模型, 分析了影响橡胶圆球弹的选择的 3 种因素, 运用 matlab 仿真软件分析了不同直径和重量的橡胶弹丸的弹道特性和终点效应, 得出了适合某型动能防暴发射器发射的最优橡胶球的直径和大小, 为某型动能橡胶弹发射器弹丸的生产制造提供了理论支撑, 可大大减少设计成本。

1 弹道模型的建立

1.1 外弹道数学方程

橡胶球动能弹, 形状为圆球形, 与常规弹的形状相差较

大, 且发射初速一般在 100 米以下, 故不适宜采用外弹道的正面问题解法。因此, 非致命动能武器外弹道仿真计算多采用与榴弹类似的低速低伸弹道解法。

前提假设如下^[2-3]: 1) 采用西亚切近似解法。2) 章动角 $\delta=0$ 。4) 不考虑弹丸出发射器以后的后效影响。5) 标准气象条件。6) 重力加速度为 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。7) 科氏加速度为 0。

选择 x 为自变量的弹丸质心运动方程组如下^[4]:

$$\begin{cases} \frac{du}{dx} = -CH(y)G(v) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = -\frac{g}{u^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = p \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{dt}{dx} = \frac{1}{u} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v = u \sqrt{1+p^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中: x 为水平坐标; y 为垂直坐标; v 任意点的速度; u 为 v 的水平分量; t 为飞行时间; $H(y)$ 为空气比重函数, 对于低伸弹道 $H(y)=1$; $G(v)$ 为空气阻力函数; C 为弹道系数; g 为重力加速度; θ 为弹轴与 x 轴的的夹角; $p = \tan\theta$ 。

积分的初始条件是:

当 $x=0$ 时, $u=u_0=v_0\cos\theta_0$; $p=p_0=\tan\theta_0$; $y=0$; $t=0$ 。

收稿日期:2015-12-13; 修回日期:2016-01-12。

基金项目:国家社科基金军事学项目(13GBJ003-242)。

作者简介:刘小华(1988-),男,硕士研究生,主要从事非致命武器技术方向的研究

郭三学(1962-),男,陕西富平人,博士,教授,主要从事军事装备学与非致命武器方向的研究。

仿照西亚切解法，引入假速度 $U \equiv \frac{u}{\cos\theta_0}$ 取代实际速度 $v = \frac{u}{\cos\theta}$ ，引入西亚切取代^[5] $H(y)G(v) = \cos\theta_0 G(U)$ 。

通过求解得到弹道方程如下：

$$\begin{cases} v = \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} v_0 e^{-Kx} \\ \tan\theta = \tan\theta_0 - \frac{g}{2Kv_0^2 \cos^2\theta_0} (e^{2Kx} - 1) \\ y = x \tan\theta_0 + \frac{gx}{2Kv_0^2 \cos^2\theta_0} - \frac{g}{4K^2 v_0^2 \cos^2\theta_0} (e^{2Kx} - 1) \\ t = \frac{1}{Kv_0 \cos\theta_0} (e^{Kx} - 1) \end{cases}$$

式中， $K=4.74\times10^{-4}CC_{x_0}^-$ 为空气阻力对弹道的影响。

1.2 参数计算

弹道系数 $C = \frac{id^2}{m} \times 10^3$ 。根据 43 年定律，弹形系数^[6] 计算公式如下：

$$i_{43} = 2.900 - 1.373H + 0.320H^2 - 0.0267H^3$$
$$H = \frac{L_h}{d} + \frac{L_t}{d} - 0.3$$

式中， L_h 为弹丸头部长度， L_t 为弹丸尾部长度，对于圆球形弹子，其头部长度和尾部长度分别是直径的一半^[7]。故 $H = 0.7, i = 2.0865$ 。

所以对于橡胶圆球弹丸弹形系数是定值，始终等于 2.0865。由于橡胶圆球弹属于钝弹，发射速度，更符合西亚切阻力定律。又因为 $i_{43} \approx 2i_{西}$ ，故 $i_{西} = 1.0425$ 。

$C_{x_0}^-$ 为标准阻力定律，按照西亚切阻力定律^[8]，当速度 v 在 50~150 m/s 时， $C_{x_0}^- = 0.255$ 。

2 影响圆球橡胶弹选择的因素

国内外典型橡胶圆球弹是某型动能防暴发射器弹丸选择的基本依据，空气阻力对弹道的影响 K 值对橡胶弹选择的关键因素，动能和比动能关系到橡胶弹是否到达非致命安全标准。

2.1 国内外典型橡胶圆球弹的大小

从表 1 可以看出，国内外橡胶圆球弹直径^[9] 一般有 5 mm、8 mm、15 mm，其中以 8 mm 和 15 mm 居多。橡胶球质量有 0.34 g、0.35 g、1.75 g 等几种，大部分在 0.35 g 左右。

表 1 国内外典型橡胶圆球弹的大小

	直径/mm	质量/g
12 号刺痛弹：2552 型	8	0.35
12 号刺痛弹：2555 型	15	—
18.4 mm 动能橡胶霰弹	8	0.85
37/38 mm 刺痛弹：3553 型	8	0.35
37/38 mm 刺痛弹：3559 型	15	1.75
JYD-1 型手榴弹	5	0.34
模块化骚乱人群控制弹	8	0.33

2.2 空气阻力对弹道的影响 K

空气阻力对弹道的影响 K 值的计算公式如下：

$$K = 4.74 \times 10^{-4} \times \frac{id^2}{m} \times 10^3 C_{x_0}$$

对于圆球形动能橡胶弹 $i = 1.0425, C_{x_0}^- = 0.255, K$ 只和橡胶球直径和质量有关，质量一定时，直径越大， K 值越大；直径

越大， K 值越小， K 值是选择橡胶球的关键因素。

2.3 橡胶弹动能和比动能的影响

橡胶弹动能和比动能主要考虑的是作用于目标身上的是否能达到非致命性要求，公式如下：

动能： $E = 1/2mv^2$

比动能： $e = \frac{E}{s} = \frac{0.5mv^2}{1/4\pi d^2} = \frac{2mv^2}{\pi d^2}$

非致命动能橡胶弹作用与人体不能导致致命性伤害，根据动能弹的致伤标准规定，动能弹使用时不得向人体喉部以上部位射击，对人体（不含喉部以上部位）不得造成中度和中度以上的损伤。防暴动能弹的损伤分度见表 2^[10]。

表 2 防暴动能榴（霰）弹致伤效应

损伤 分度	能量范围		
	直径大于 10 mm 的球形或圆柱形投射体（邵氏硬度 $A<90$ ）	直径小于和等于 10 mm 的球形投射体（邵氏硬度 $A<90$ ）	
	比动能 J/cm ²	动能 J	比动能 J/cm ²
0	≤0.5	≤5.0	≤0.5
I	>0.5~4.0	>5.0~27.0	>0.5~4.0
II	>4.0~12.0	>27.0~120	>4.0~28.9
III	>12.0~30.0	>120~300	>28.9~56.0
IV	30.0~50.0	>300	>56.0
V	>50.0		

比动能标准在 $0.5 \text{ J/cm}^2 \leq e \leq 28.9 \text{ J/cm}^2$ ，对于直径大于 10 mm 的球形， $0.5 \text{ J/cm}^2 \leq e \leq 12 \text{ J/cm}^2$ ，且动能在 $5 \text{ J} \leq e \leq 120 \text{ J}$ 范围之内。

3 橡胶圆球弹的优化选择和弹道仿真分析

3.1 橡胶圆球弹的优化选择

国内外橡胶球的直径大多为 8 mm、15 mm，下面以 8 mm、10 mm、15 mm3 种直径的橡胶球来对比选择哪一种直径的橡胶球更好^[11]。某型动能防暴发射器初速为 87.92 m/s，现设定发射角度为 10 度，分别分析直径 8 mm、10 mm、15 mm，质量分别为 0.4 g、1 g、2 g、3 g、4 g、5 g（质量变化主要通过橡胶内部填充钢球来实现）的 K 值、最大射程、终点速度、飞行时间、比动能以及直径 15 mm 的动能的关系，重点分析比动能和 K 值对弹道特性及终点效应的影响。

表 3 直径为 8 mm 不同质量下的终点参数

橡胶球质量/g	0.4	1	2	3	4	5
K	2.02E-02	8.06E-03	4.03E-03	2.69E-03	2.02E-03	1.61E-03
发射距离/m	73.8	123.4	164.6	187.2	201.8	211.9
落地速度/(m/s)	21.06	33.76	46.22	53.91	59.16	63.01
飞行时间/s	2.02	2.44	2.70	2.81	2.88	2.92
比动能/(J/cm ²)	0.18	1.13	4.25	8.67	13.93	19.75
动能/J	0.09	0.57	2.14	4.36	7.00	9.92

表 4 直径为 10 mm 不同质量下的终点参数

橡胶球质量/g	0.4	1	2	3	4	5
K	3.15E-02	1.26E-02	6.30E-03	4.20E-03	3.15E-03	0.00252
发射距离/m	56.2	98.2	138	162.2	178.6	190.6
落地速度/(m/s)	16.61	26.95	38.00	45.45	50.91	55.11
飞行时间/s	1.79	2.24	2.54	2.68	2.77	2.83
比动能/(J/cm ²)	0.07	0.46	1.84	3.95	6.60	9.67
动能/J	0.06	0.36	1.44	3.10	5.18	7.59

表 5 直径为 15 mm 不同质量下的终点参数

橡胶球质量/g	0.4	1	2	3	4	5
K	$7.09\text{E}-02$	$3.54\text{E}-02$	$2.84\text{E}-03$	$1.42\text{E}-03$	$9.45\text{E}-03$	0.0070875
发射距离/m	31.8	52	60.3	92	114.2	131
落地速度/(m/s)	10.85	15.59	17.55	25.34	31.21	35.95
飞行时间/s	1.39	1.73	1.84	2.19	2.37	2.49
比动能/(J/cm ²)	0.01	0.06	0.09	0.36	0.83	1.46
动能/J	0.02	0.10	0.15	0.64	1.46	2.58

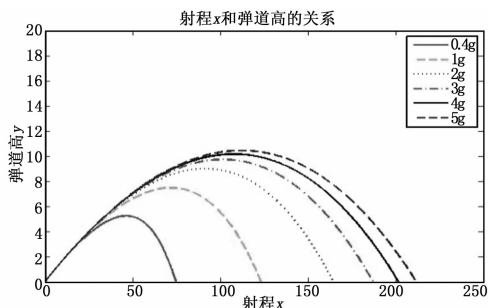


图 1 直径 8 mm 不同质量的弹道曲线

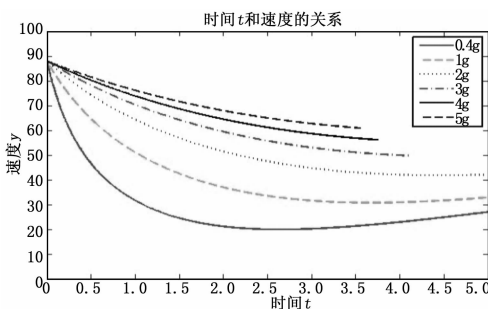


图 2 直径 8 mm 不同质量的时间和速度变化曲线

从表 3、表 4、表 5 以及图 1 和图 2 可以看出, 橡胶球直径为一定时, 随着质量增加, K 值减小, 射程增大, 终点速度增大, 飞行时间变长, 比动能也增大。说明质量大的橡胶弹丸, 存速能力增强, 动能打击效果好。

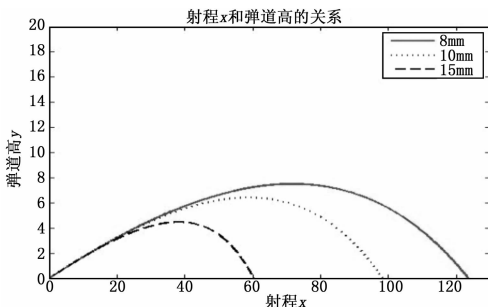


图 3 质量为 1 g 不同直径下的的弹道曲线

从表 3 至表 5 以及图 3 和图 4 可知, 当质量一定时, 随着直径的增大, K 值增大, 射程降低, 落地速度降低, 飞行时间变短, 比动能也相应的减少。说明直径大的橡胶弹丸, 存速能力低, 动能打击效果小。

根据表 1 的动能和比动能标准分析, 8 mm 圆球形橡胶球的质量小于 0.6 g 时, 比动能在 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ 以下, 动能打击效果不好, 故 8 mm 橡胶球不然选择 0.6 g 以下的。国内外广泛选择直径为 8 mm, 质量在 0.34 g 左右的橡胶球的原因是, 橡

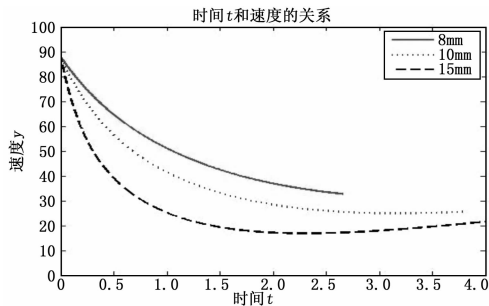


图 4 质量为 1 g 不同直径下的时间和速度变化曲线

胶球基本上内装在非致命手榴弹内, 爆炸后橡胶球飞行距离近, 终点速度大, 故能保证一定的比动能。

10 mm 圆球形橡胶球质量在 5 g 以下时, 比动能均在 $9.671\text{J}/\text{cm}^2$ 以下, 但是质量为 1 g 以下时, 比动能小于 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ 不符合标准。故不选择质量为 1 g 以下的 10 mm 橡胶球。

15 mm 圆球形橡胶球, 动能在 $5\text{J} \leq e \leq 120\text{J}$, 范围之内。故 5 g 以下的都不满足标准。5 g 以上的橡胶弹丸不仅重量大, 不符合经济性要球, 而且国内外橡胶弹丸一般都在 2 g 以下, 所以直径为 15 mm 的橡胶弹丸不适合远距离发射。

综合以上各个因素, 直径为 10 mm, 质量为 2 g 的橡胶球最适合作为某型动能防暴发射器的弹丸。

3.2 弹道仿真分析

直径为 10 毫米, 质量为 2 克的橡胶球, 空气阻力对弹道的影响 K 为 0.006 2。当初速为 87.92 m/s, 分析不同射角情况下, 弹道变化曲线。以及射程和比动能关系。

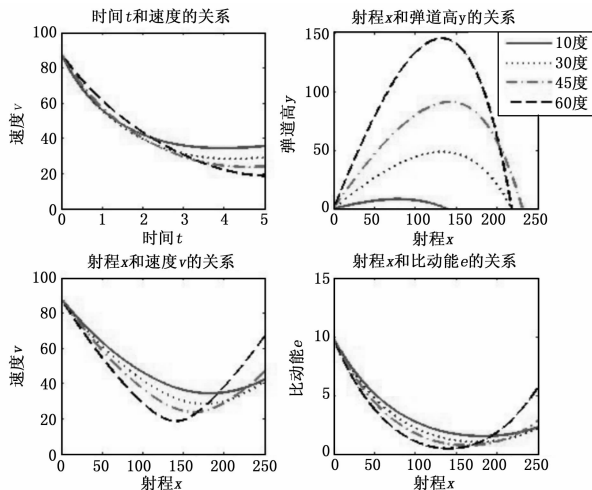


图 5 直径为 10 mm 质量 2 g 的弹道曲线及速度、时间、比动能变化曲线

由图 5 和表 6 可知, 直径为 10 mm 质量 2 g 的橡胶弹随着发射角度的增加飞行时间越久, 因为发射角度越大, 弹道越高, 在空中停留时间就久。最大射程从射角 0 度到 45 度逐渐增大, 45 度达到最大值, 为 231 米, 射角超过 45 度以后, 最大射程慢慢变小, 射角在 30 度和 60 度之间, 射程都在 217 米到 231 米, 直径按变化范围不大。终点速度和比动能变化一致, 在 10 度左右时, 因为射程较近, 只有 138 米, 且弹道低伸, 飞行高度不高, 故存速能力强; 射角在 20 度以后, 随着射角增大, 弹道越来越高, 重力加速度对橡胶弹丸作用明显, 故终点速度和比动能随着射角的增大而增大, 如图 5 所示, 射

角在 60 度时, 速度和比动能的变化尤为明显。

表 6 直径为 10 mm 质量 2 g 的终点参数

	最大射程 /m	终点速度 / (m/s)	飞行时间 /s	终点比动能 / (J/cm ²)
10 度	138	38.004	2.540	1.840
20 度	190.9	31.549	4.475	1.268
30 度	217.8	32.827	6.137	1.373
40 度	229.6	36.644	7.655	1.711
45 度	231	38.992	8.389	1.937
50 度	229.6	41.558	9.123	2.200
60 度	217.8	47.316	10.629	2.852

在实际应用中, 射角一般控制在 10 度左右, 因为随着射角的增大, 在空中停留时间越长, 风速等外在因素对弹道的影响就越大, 从而影响射击的精度。射角在 10°时, 弹道低伸, 最大射程有 138 m, 能满足执勤、处突和维稳的需要, 作用于有生目标的比动能为 1.84J/cm², 对有生目标造成轻微损伤, 不仅能达到战术目的, 而且安全性高。

4 总结

1) 本文在相关假设的前提下, 建立了橡胶圆球弹丸质点运动模型, 从当前国内外橡胶球大小、空气阻力对弹道影响和非致命动能弹的致伤判据 3 个方面分析了对橡胶弹丸优化选择的影响。

2) 运用 matlab 仿真软件, 比较 8 mm、10 mm、15 mm 3 种直径不同和重量的橡胶圆型弹丸的弹道特点和终点效应, 结果表明在直径相同条件下, 质量越大, 空气阻力对弹道影响的

(上接第 112 页)

器人的动子端点做加速运动, 脉冲频率是一个递增的过程, 且加速度的值越大, 加速过程也就越快, 加速时间越短。加速度的绝对值越大, 脉冲频率的变化(增大或减小)就越快, 加速或减速的过程也就越短。所得到的脉冲信号经过差分驱动芯片进行差分处理, 幅值也被一定程度地放大, 使得控制器最终的输出电平为与伺服驱动器兼容的 422 差分电平。

以上分析结果表明, 本文所设计的双架构运动控制器能满足伺服过程中的各种加减速要求, 并为伺服系统提供稳定可靠的脉冲给定, 所述的并联机器人运动控制系统, 在实际应用中, 只需要通过设置几个伺服参数, 根据具体情况, 可以直接调用所设计的指令, 实现对所有带 Step+Dir 接口的伺服电机的控制, 具有较强的通用性。

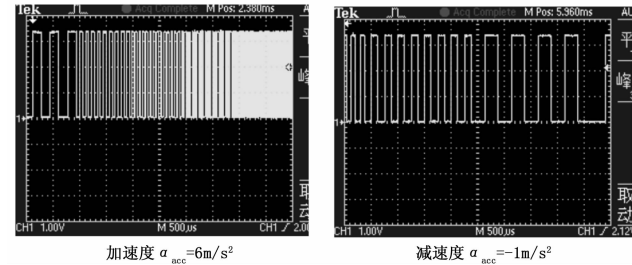


图 9 不同加速度值时的加减速脉冲波形

4 结束语

通过对两自由度并联机器人控制系统的理论研究, 在实际样机测试达到了预期的控制效果。本设计仅对两自由度做出了

K 值越小, 射程越远, 存速能力越好; 在质量相同条件下, 直径越大, 空气阻力对弹道影响的 K 值越大, 射程近, 存速能力低。得出了直径 10 mm, 质量 2 g 的橡胶弹最适合作为某型动能防暴发射器的弹丸。

3) 分析了直径 10 mm, 质量 2 g 的橡胶弹在不同发射角度情况下的弹道特性和终点效应, 结果表明, 该橡胶弹存速能力强, 发射距离远, 安全性高, 为某型动能防暴发射器的弹丸制造提供了理论支撑。

参考文献:

[1] 郭三学. 非致命武器技术 [M]. 西安: 西北工业出版社, 2015.
[2] 徐明友. 火箭外弹道学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
[3] 牛福强, 洪亚军, 徐 诚. 某自行火炮全弹道多学科优化设计 [J]. 火力与指挥控制, 2014 (11): 160-163.
[4] 赵法栋, 庄弘炜. 基于 Matlab/Simulink 的防暴动能弹弹道仿真 [J]. 装备制造技术, 2009 (10): 51-53.
[5] 高义旗, 郭三学, 周 铭, 等. 非致命防暴弹外弹道仿真 [J]. 计算机仿真, 2013, 30 (8): 10-13.
[6] 王连敏. 低速低伸弹道解法 [J]. 兵工学报, 1981: (01).
[7] 周 璇. 特种机械系统的动力学仿真与优化设计 [D]. 南京理工大学, 2004.
[8] 周克栋, 谭东汉, 徐 诚, 等. 霰弹子外弹道理论与计算 [J]. 兵工学报, 2000 (4): 301-304.
[9] 任 雨. 意大利反恐怖装备 [J]. Small Arms, 2002, (09).
[10] GJBZ 20262-95. 中华人民共和国国家军用使用标准-防暴动能弹威力标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
[11] 金云凤. 细数美国非致命武器(四) [J]. 轻兵器, 2006, (04): 16-17.

研究, 对多自由度的研究是并联机器人系统的发展方向。代替 MCU+CPLD 双控制架构的解决方案是采用单颗 FPGA 芯片作为控制器的架构, 使系统的控制板更加细小, 节约成本。随着工业化进程的不断发

参考文献:

[1] 田 涛. 一种高速拾取并联机器人的设计与实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
[2] 田家林. 基于 ARM 与 FPGA 的运动控制系统的设计 [D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
[3] 施 俊. 直线感应电机双边驱动电梯的控制系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
[4] Stan S, Maties V, Balan R. New Methodology and Evaluation of Micro Parallel Robots for Optimal Design [A]. The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human interactive Communication [C]. 2007: 894-899.
[5] Stan S, Maties V, Balan R. Workspace optimal design of a 2 DOF micro parallel robot using genetic algorithms and simulated annealing optimization methods [A]. International Conference on Mechatronics and Automation [C]. 2007: 1108-1113.
[6] 洪乃刚, 等. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
[7] 齐 珊. 多轴运动控制系统设计 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
[8] 蒙博宇. STM32 自学笔记 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
[9] 黄 任. AVR 单片机与 CPLD/FPGA 综合应用入门 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.