

doi: 10.7690/bgzdh.2015.04.014

## 平面二自由度并联机器人结构优化与操作空间选择

陈志文<sup>1</sup>, 江国栋<sup>1</sup>, 张新宇<sup>1</sup>, 秦佳<sup>2</sup>, 陈卓<sup>1</sup>

(1. 总装防化某军代室, 成都 610041; 2. 苏州大学机电学院, 江苏 苏州 215021)

**摘要:** 针对毛坯锻造自动化生产等对高节拍低精度往复运动的搬运操作需求, 提出一种基于平面双滑块机构的二自由度并联机器人。由平面上互相平行的 2 个直线运动滑块驱动机器人末端实现竖直平面内的物料搬运运动, 建立机器人运动学模型, 基于灵巧度和全局性能指数进行机器人结构参数设计, 同时兼顾运动周期与运动精度, 获得机器人操作空间。实验分析结果表明: 机器人工作周期为 1.5 s, 竖直位移为 245 mm, 末端轨迹精度为  $\pm 1.5$  mm, 证明机器人具有良好的运动精度和足够的运动位移, 以及良好的工作效率。

**关键词:** 二自由度; 并联机构; 操作空间; 优化设计

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Structure Optimization and the Choice of Operating Space of Planar 2-DOF Parallel Manipulator

Chen Zhiwen<sup>1</sup>, Jiang Guodong<sup>1</sup>, Zhang Xinyu<sup>1</sup>, Qin Jia<sup>2</sup>, Chen Zhuo<sup>1</sup>

(1. Military Representative Office of General Armaments Department Chemical Defense, Chengdu 610041, China;

2. College of Electromechanical, Soochow University, Soochow 215021, China)

**Abstract:** For the demand of automotive electronics industry for high tempo, reciprocating motion of the handling operation, a kind of two degree of freedom (2-DOF) parallel manipulator based on planar double slider mechanism was presented. Two sliders of linear motion, which are parallel to each other on the plane, drive the end of the manipulator to make vertical movement for material handling. Kinematic model of the manipulator is established. Based on the dexterity and overall performance index, the parameter of the structure is designed. Considering both motion cycle and movement precision of robot, the operation space of manipulator is acquired. Experimental analysis shows that the robot working cycle is 1.5 s, the vertical displacement is 245 mm, the end of the positioning accuracy is  $\pm 1.5$  mm. The robot has great kinematic accuracy and kinematic displacement, and high work efficiency.

**Keywords:** two degrees of freedom; parallel mechanism; operating space; optimization design

### 0 引言

在汽车零部件毛坯锻造和包装码垛等过程中需要高节拍往复搬运工作。传统的搬运工作通常由串联机器人手臂或直角坐标型机器人手臂实现<sup>[1]</sup>。虽然串联与直角坐标式机器人结构简单, 但空间占用大, 系统惯量大, 需要很高的动力输入才能获得高工作节拍<sup>[2]</sup>。与串联机器人相比较, 并联机器人刚度重量比高、承载能力强、容易获得高的加速度与速度<sup>[3]</sup>。

近年来, 并联机器人在零部件搬运和加工等方面逐步获得广泛应用。天津大学在国家 863 计划的资助下, 发明了具有我国自主知识产权的二自由度 Diamond 和三自由度 Delta-S 高速抓放机<sup>[4-5]</sup>, 与杭州娃哈哈集团有限公司、江阴纳尔捷机器人有限公司、天津力神电池股份有限公司等合作研制出了高速果奶装箱一体机、多功能输液软袋装箱机、高性能锂离子电池分选机等成套装备, 在实际应用中

获得好评。日本东北大学的 Masaru Uchiyama 等人和丰田公司机床部于 1991 年联合研制了高速并联机器人 HEXA, 该工业机器人既保证了产品质量, 又减少了特殊环境工作的危险, 显著降低了人员的劳动强。

与串联机器人不同, 并联机器人在其可达工作空间, 不同位置末端具有不同的速度与位置特性。为了使机器人具有较好的速度与精度特性, 需对其工作空间、结构参数等进行分析与优化。J.Salisbury 等<sup>[6]</sup>提出以雅可比矩阵条件数衡量机器人的灵巧度, 该衡量指标已被公认。Yoshikawa<sup>[7]</sup>则提出了可操作度衡量操作器的灵巧性。Gosselin 和 J.Angelos<sup>[8]</sup>提出了以雅可比矩阵条件数的全域均值(全局性能指数)作为空间评价指标。

面向锻造、搬运等对搬运机器人的需求, 提出一种二自由度并联机器人, 通过平面上互相平行的 2 个直线运动滑块, 驱动末端实现竖直工作空间内

收稿日期: 2014-12-23; 修回日期: 2015-01-16

作者简介: 陈志文(1982—), 男, 江苏人, 工程硕士, 工程师, 从事机械设计制造及材料加工工程研究。

的物料抓取搬运运动。相比于传统的直角坐标式垂直物料搬运机构，该机器人具有系统惯量小、高速、高精度的特点，可实现高节拍的物料搬运。现以机器人灵巧度和全局性能指数作为指标，对机器人结构参数和操作空间进行优化。

### 1 机器人运动学建模

#### 1.1 运动学建模

如图 1，平面并联机器人由滑轨、滑块、机械臂和操作末端组成。由 2 个滑块在水平面内的直线运动带动 2 个机械臂，实现末端在竖直平面内的直线运动。此外，机械臂采用平行四边形机构限制了末端的旋转自由度，保证了末端的平动运动。机器人结构简图如图 1。



图 1 机器人三维图

建立如图 2 所示坐标系，图中  $S_1$ 、 $S_2$  为滑块在  $x$  坐标轴上的位移， $s$  为两滑块相对位移， $H_1$  为 B 滑块铰链与滑轨的距离，由于末端在滑块同侧运动，因此 A、B 滑块铰链产生高度差  $h$ ， $L_1$ 、 $L_2$  为 2 个机械臂的长度。

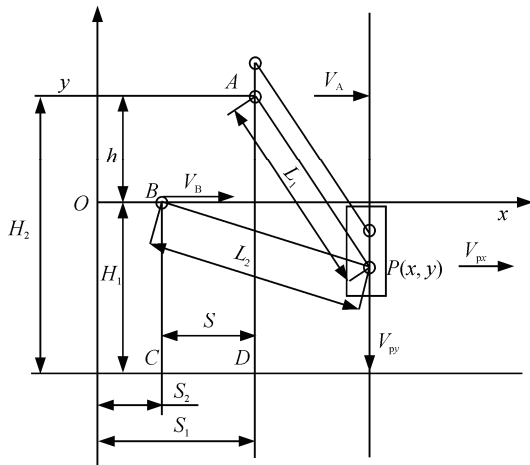


图 2 机器人结构简图

机构中由于 2 个滑块有高度差，因此其铰链的机械臂长度不同，分别为  $L_1$ 、 $L_2$ ，由机构操作末端空间分析可知  $L_2=L_1+h$ <sup>[9]</sup>。

根据图 2 由几何关系得，机器人操作末端位置坐标由以 A、B 两点为圆心，机械臂 AP、BP 为半径的 2 个圆的交点坐标确定。在  $O-xy$  坐标系内，其轨迹可由下式描述。

$$\begin{cases} (x - S_1)^2 + (y - h)^2 = L_1^2 \\ (x - S_2)^2 + y^2 = L_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $S_1$ 、 $S_2$  为时间  $t$  的函数； $(x, y)$  为末端位置坐标。

以  $S_1$ 、 $S_2$  为机器人运动学输入，末端的位置  $(x, y)$  为机器人运动学输出，根据式 (1) 可求得机器人运动学正解，如式 (2) 和式 (3)：

$$x = \frac{(s^2 h^2 + L_2^2 s^2 + s^4 - s^2 L_1^2) \pm h(AB)^{\frac{1}{2}}}{2s(s^2 + h^2)} \quad (2)$$

$$y = \frac{(hs^2 + h^3 + L_2^2 h - hL_1^2) \pm (AB)^{\frac{1}{2}}}{2(s^2 + h^2)} \quad (3)$$

式中： $s = S_1 - S_2$ ； $A = -s^2(h^2 + s^2 - L_2^2 - 2L_2L_1 - L_1^2)$ ； $B = h^2 + s^2 - L_2^2 + 2L_2L_1 - L_1^2$ 。

由方程 (1) 求得逆解为：

$$\begin{cases} S_1 = x \pm \sqrt{L_1^2 - (y - h)^2} \\ S_2 = x \pm \sqrt{L_2^2 - y^2} \end{cases} \quad (4)$$

由于机器人工作时操作末端位于两滑块同侧，所以正逆解中  $\pm$  都取 -。

机器人的工作要求为操作末端在抓取物料时垂直方向 ( $y$  方向) 垂直运动，在横向 ( $x$  方向) 无水平运动。在两滑块以  $v_A$ 、 $v_B$  相对运动时，操作末端在  $x$  方向和  $y$  方向分别产生速度  $v_{px}$  和  $v_{py}$ ，所以要使得操作末端实现垂直而无水平运动，则输入端要同时施加一个反向速度的  $v_{px}$ 。即输入端速度如下式：

$$\begin{cases} v_{RA} = v_A - v_{px} \\ v_{RB} = v_B - v_{px} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $v_{RA}$ 、 $v_{RB}$  为实际输入速度。

由式 (2) 和式 (3) 可得出输入与输出速度的非线性映射关系，如下式

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x(t)}{\partial S_1(t)} & \frac{\partial x(t)}{\partial S_2(t)} \\ \frac{\partial y(t)}{\partial S_1(t)} & \frac{\partial y(t)}{\partial S_2(t)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{S}_1(t) \\ \dot{S}_2(t) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{令 } \mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x(t)}{\partial S_1(t)} & \frac{\partial x(t)}{\partial S_2(t)} \\ \frac{\partial y(t)}{\partial S_1(t)} & \frac{\partial y(t)}{\partial S_2(t)} \end{pmatrix}, \text{ 则 } \mathbf{J} \text{ 为一阶影响系数矩}$$

阵<sup>[10]</sup>, 即雅克比矩阵。由于表达式  $\mathbf{J}$  过于复杂, 在此不详细列出。

### 1.2 机构参数分析

以机器人的典型抓取操作为例进行机器人结构参数分析。以在 1 s 时间内实现 0.3 m 提升运动为例。

由于此工作过程并未考虑水平方向的运动, 因此对机器人只有垂直速度和距离的要求, 所以由正解方程 (3) 可得, 操作末端位置  $y$  向变化由高度差  $h$  和机械臂长  $L_2$  决定。假设固定高度差  $h=0.05$  m, 两滑块相对速度  $v=0.05$  m/s,  $x$  初始位置为 0。根据式 (3) 得到  $L_2$ 、 $t$  和操作末端  $y$  向坐标关系, 如图 3 所示, 将图 3 向  $L_2$  向投影, 得到  $L_2$  向正视图如图 4。

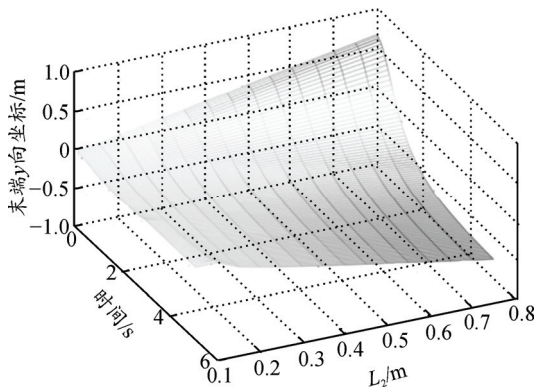


图 3  $L_2$ 、 $t$  和末端  $y$  坐标关系

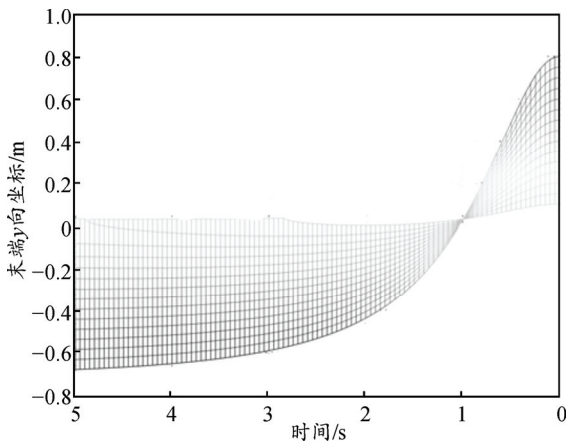


图 4  $L_2$  向正视图

由图 4 分析可知: 在同一时刻,  $L_2$  越长, 斜率越大, 速度越大。同一杆长, 相同末端操作空间(足够大时), 操作空间中点越小, 操作时间越长。如末

端  $y=0.6$  m 运动到 0.4 m, 比  $y=0.4$  m 到 0.2 m 所用的时间  $t$  长。若操作空间过小, 由末端  $y$  向速度、 $L_2$  和  $t$  关系图 5 分析可知: 在接近 0 时刻时,  $y$  向速度先增后减, 例如在时间  $t$  从 0 到速度为最大时刻内, 操作空间长度小于所走过的操作空间, 则随着操作空间中点的由大变小, 操作时间会由长变短再变长。

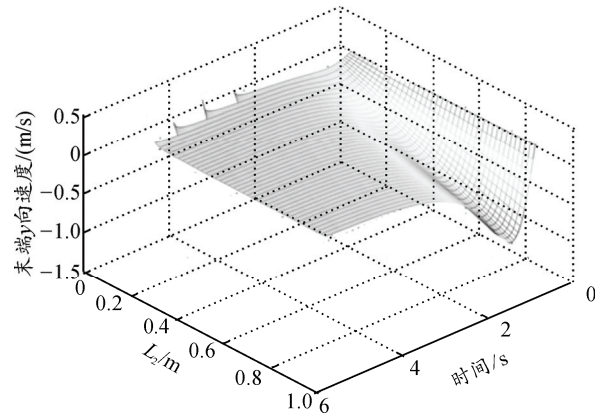


图 5  $L_2$ 、 $t$  和末端  $y$  向速度关系

同样采用上述分析方法, 可得  $h$  与末端速度成反比。

因此, 对于机器人某一要求的行程与速度可以通过改变  $h$  与  $L_2$  2 个参数, 求得符合工作要求的结构参数。如对于固定长度和位置的操作空间, 需要提高运动速度, 可增加  $L_2$  的长度或减小  $h$  高度。如果  $L_2$  与  $h$  不改变, 也可通过改变操作空间中心位置来满足要求。

## 2 结构参数与操作空间优化

对于并联机器人, 在其工作空间内, 机器人的速度、精度特性各不相同, 因此, 机器人操作空间的选择为机器人运动学研究中的重要问题。

### 2.1 基于操作周期的机械臂长度设计

机器人工作时要保证其工作频率与工作行程, 所以需在确定工作行程和滑块的相对速度后, 设计结构参数, 选择操作空间, 以满足实际工作要求。现以初定工作空间长度为 0.3 m, 操作始末点  $y$  向坐标  $y=0.1$  m 和  $y=-0.2$  m, 相对平均速度  $v=0.05$  m/s,  $h=0.05$  m, 以竖直方向往复运动, 2 s 一个周期为例进行优化。由于机器人在结构上存在  $L_2=L_1+h$ , 在选定  $h$  后只需就行  $L_2$  求解分析。

以工作周期的时间要求进行机械臂长度设计, 流程如图 6 所示。

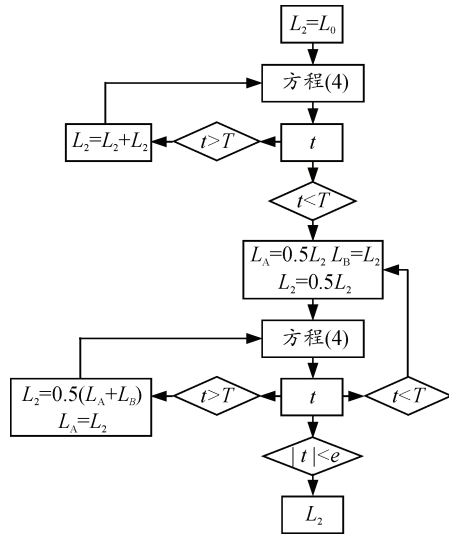


图6 机械臂设计流程

其中： $L_0$ 为初定机械臂长； $T$ 为工作半周期； $t$ 为不同机械臂长操作半周期时间； $e$ 为末端在操作空间内运动的时间误差。

通过计算求得  $L_2$  为 0.445 m 时，末端从高度  $y=0.2$  m 到 0.1 m 为 0.999 9 s，如图 7 所示。

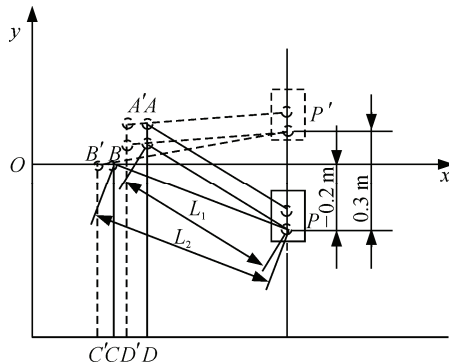


图7 操作末端运动简图

### 2.2 基于条件数的精度分析与结构优化

上一节进行了基于特定操作空间位置和时间要求进行的杆长设计。由于操作空间位置是任意选定的，因此无法确定杆长对应的操作空间的运动精度。

运动学分析中，求得了输入速度与输出速度的非线性映射关系，两者以雅可比矩阵  $J$  联系。从雅可比矩阵  $J$  可看出：输入与输出速度关系不依赖于输入速度本身，只与机构所处位置有关。

雅可比矩阵的条件数  $k$  作为机器人运动灵巧度现已被学术界公认，条件数  $k$  越小，运动精度越高。 $J$  的条件数  $k$  为  $J$  的最大最小奇异值之比，如下式

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (7)$$

式中  $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  为  $J$  的最大最小奇异值。

雅可比矩阵条件数  $k$  只能表示局部运动传递精度的局限性，现使用基于条件数的全局性能指数来衡量空间操作性能。该指数越大，操作空间内的运动精度越高。全局性能指数表达式为

$$\eta = \frac{\int_L \frac{1}{k} dL}{\int_L dL} \quad (8)$$

式中： $L$ 为工作路径； $k$ 为雅可比矩阵条件数。

基于全局性能指数来探究操作空间位置、机械臂  $L_2$  长度和全局性能指数的关系，如图 8 所示。

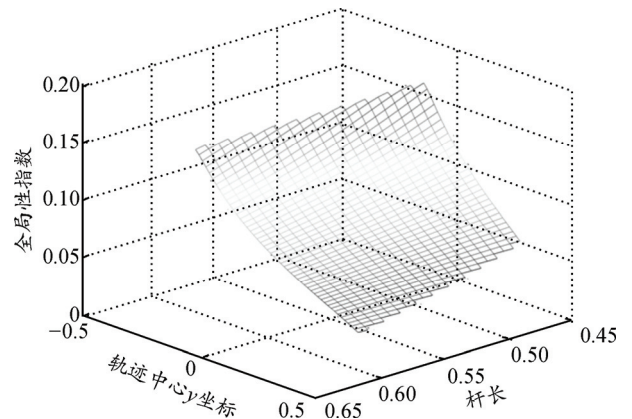


图8  $L_2$ 、操作空间中心位置和  $\eta$  关系

由图 8 可知：在一定机械臂长下，末端操作空间轨迹中心与全局性能指数成反比；在相同末端操作空间轨迹中心处， $L_2$  长度与全局性能指数成反比。对于相同的操作空间长度，机械臂  $L_2$  越短、操作空间中心位置越小，全局性能指数越大，即机器人的运动精度越高。

由结构参数对机器人的影响分析可知：相同机械臂长下，操作空间中心位置越小，操作时间越长。所以，由操作周期设计的机械臂长度下，不能通过下移操作空间提高全局性能指数。下移操作空间会使操作周期变大。因此，只能通过减小机械臂长度，提高全局性能指数。然而，减小机械臂长度后，操作时间会增加(假设操作空间长度足够大)，所以必须使操作空间上移，以弥补缩短机械臂所增加的运动时间。

现以式 (8)，通过减小机械臂长、上移操作空间，所得的全局性能曲线如图 9。

由图 9 可知：在机械臂  $L_2=0.357$  m 时得到最大全局性能指数  $\eta=0.0771$ 。在此机械臂长度下，操作始末点  $y$  向坐标  $y=0.1818$  m 和  $y=-0.1182$  m，运动周期为 1.999 9 s。



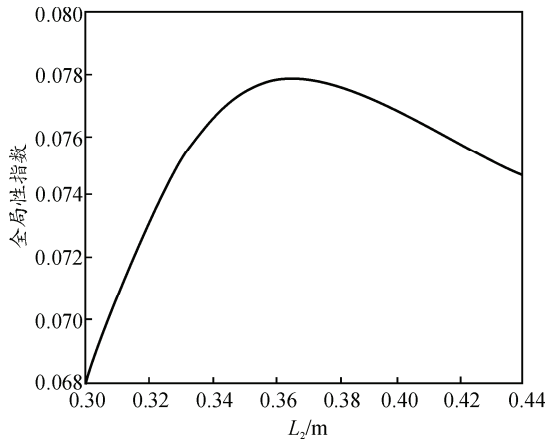
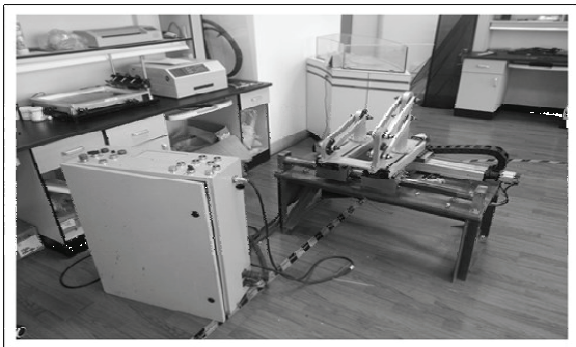


图 9 机械臂长与  $\eta$  关系

### 2.3 实验研究

根据理论计算得出的机器人的结构尺寸，设计机器人结构如图 10。采用 PLC 搭配 3 个独立的控制器控制伺服电机驱动直线导轨，驱动机器人做三维运动。



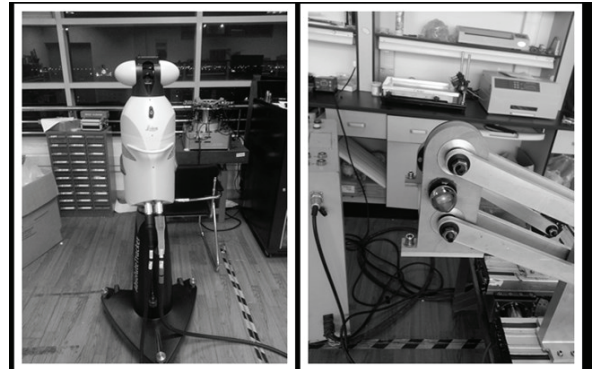
(a) 系统组成



(b) PLC 控制机箱

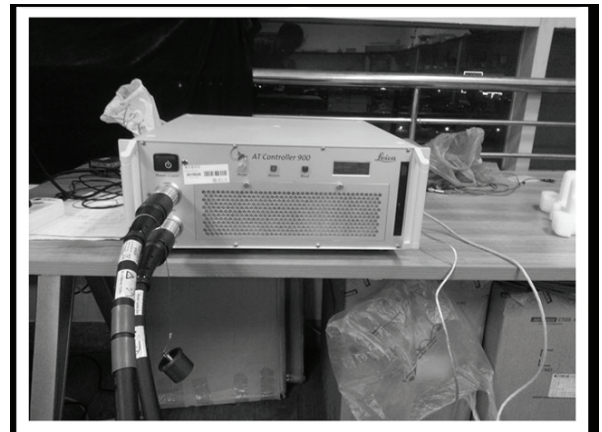
图 10 机器人结构

机器人控制策略采用逆解运动方程控制，利用激光跟踪仪(如图 11)测定机器人本身运动坐标，然后根据所测定的坐标，测定机器人末端的  $X$  向运动数据，对运动数据进行最小二乘法拟合后，对控制方程补偿。



(a) 激光跟踪仪

(b) 靶标



(c) 测量设备处理系统

图 11 激光跟踪仪测量设备

由于控制器的限制，机器人运动周期设定为 1.5 s，实验结果如图 12 和图 13 所示。

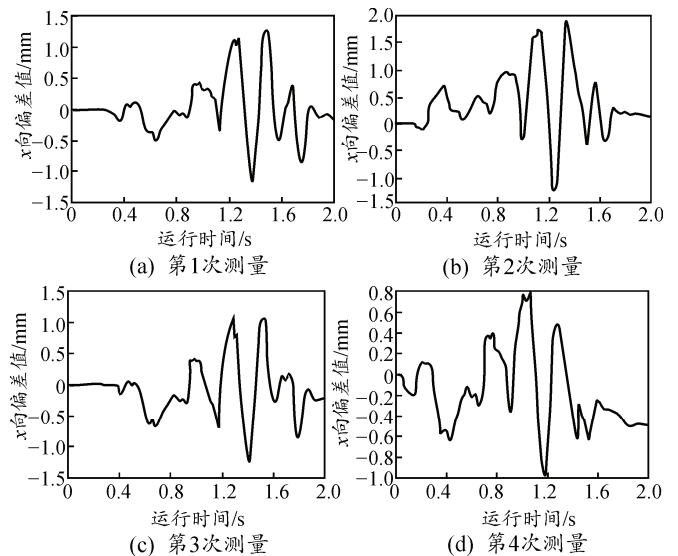


图 12  $x$  向运动精度

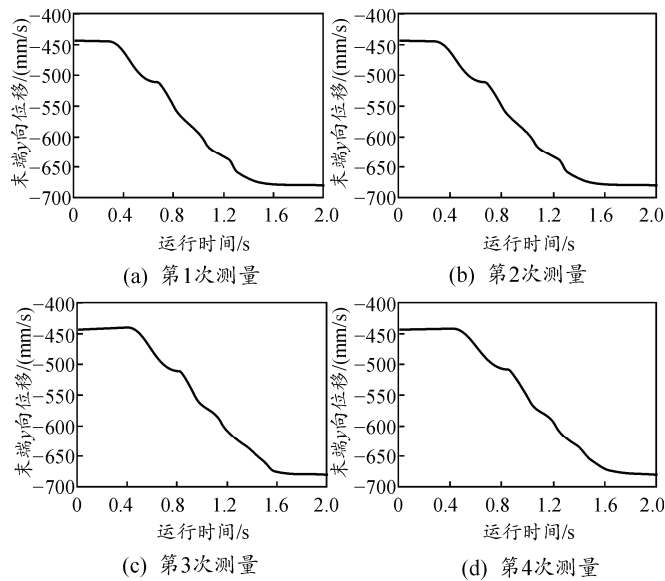


图13 末端y向运动空间

由图12、图13可知,末端在 $x$ 向运动精度为 $\pm 1.5$  mm,机器人 $y$ 向竖直工作空间稳定为245 mm,与理论分析的0.3 m有些差距,这是由于机器人结构制造误差、装配误差、初始位置误差以及分步运行的程序所造成的。

### 3 结论

笔者提出了一种基于平面双滑块机构的二自由度并联机器人,建立了机器人运动学模型,分析了机器人结构参数对机器人末端运动特性的影响。通过实例对机器人进行了结构参数、灵巧度和全局性

能指数分析,并给出了机器人结构参数优化和操作空间规划过程。实验分析表明机器人具有良好的运动精度和足够的运动位移,同时有着良好的工作效率。文中提出的优化设计方法对于降低机器人系统惯量、提高操作精度有一定的意义。同时,该方法的思路也可推广到其他并联机器人的设计优化中。

### 参考文献:

- [1] 刘凤臣,姚赟峰,刘黎明,等. 高速搬运机器人产业应用及发展[J]. 轻工业, 2012, 30(2): 108-112.
- [2] 李晓冬. 并联机器人的特点及应用分析[J]. 黑龙江科技信息, 2008(10): 36-37.
- [3] 孙立宁,丁庆勇,刘新宇. 二自由度高速高精度并联机器人的优化设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 94-97.
- [4] 张利敏,梅江平,赵雪敏,等. Delata机器人动力尺度综合[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 1-7.
- [5] 张明辉,黄田. Diamond机构的弹性动力学分析和实验研究[J]. 机械设计, 2004, 21(11): 6-8.
- [6] Salisbury J, Craig J. Artificial hands force controls and kinematic issues[J]. International Journal of Robotic Research, 1983, 1(1): 4-7.
- [7] Yoshikawa T. Manipulability of Robotic Mechanisms[J]. Int.J.of Rob.Res., 1987, 4(2): 21-22.
- [8] Gosselin C, Angeles J. A global preference index for the kinematic optimization of robotic manipulator[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 220-226.
- [9] 朱小蓉,沈惠平,刘传飞,等. 二自由度并联操作手的工作空间与奇异性[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(5): 31-35.
- [10] 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论与控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1997: 79.