

文章编号:2095-0411(2017)04-0050-07

一种双手爪摆动机械手传动机构及优化设计

强恒存¹,沈惠平¹,张有斌²,孟庆梅¹,邓嘉鸣¹,刘金石²

(1. 常州大学 机械工程学院,江苏 常州 213016; 2. 金石机器人(常州)有限公司,江苏 常州 213164)

摘要:针对小空间作业要求的桁架机器人机械手的手腕结构,设计了一种应用于工业桁架机器人的双手爪 V 字型摆动机械手的传动机构,通过其静力和几何尺寸的分析,得到了机械手抓取位置时摆块的输出转矩。以摆杆和连杆长度为设计变量、以摆块最大转矩输出为优化目标建立了优化模型,并利用 MATLAB 进行了优化计算,得到了传动机构所能产生最大转矩时所对应的摆杆和连杆长度。最后,给出了机械手在整个摆动过程中,输出转矩随输入位置变化的变化图。设计的摆动手腕传力机构具有扩力效果,在不增加气缸缸径和不改变气缸行程等前提下,只优化传动机构尺寸,使传力机构达到最佳的扩力效果,从而解决了未优化前摆动块的输出力矩不满足使用条件的问题。

关键词:优化设计;静力分析;摆动机械手;传动机构;桁架机器人

中图分类号:TP 241

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2017.04.009

A Driving Mechanism of Swing Manipulator with Double Claws and Its Optimal Design

QIANG Hengcun¹, SHEN Huiping¹, ZHANG Youbin², MENG Qingmei¹, DENG Jiaming¹, LIU Jinshi²

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. Stone Robot Changzhou Co. Ltd., Changzhou 213164, China)

Abstract: Aiming at the wrist structure of the truss robot manipulator in small space operation, a driving mechanism for V-type swing manipulator with double claws is designed, which is applied to the industrial truss robot. Its output torque of swing mechanism at grasp position is calculated. Taking swinging rod length and the connecting rod length as design variables, the optimization model of the optimal objective is set up with the maximum torque output of the swing mechanism. The optimization calculation is carried out by using MATLAB. The swing rod and the connecting rod length corresponding to the maximum torque of the transmission mechanism are obtained. Lastly, the change curve of the output torque with the change of the input position is given in the whole swing process. The swing

收稿日期:2016-11-04。

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2015098);江苏省重点研发计划-产业前瞻与共性关键技术项目(BE2015043)。

作者简介:强恒存(1990—),男,安徽蚌埠人,硕士生。通讯联系人:沈惠平(1965—),E-mail:shp65@126.com

manipulator of this paper has the function of expanding force. By optimizing the size of the driving mechanism without increasing the cylinder bore and without changing the cylinder stroke, the force transmitting mechanism can achieve the best effect of expanding force. The problem that the output torque of the non-optimized swinging block being unable to meet the condition of use is solved.

Key words: optimal design; static analysis; swing manipulator; transmission mechanism; truss robot

随着智能化工业机器人的日益推广和应用,“无人化”车间成为了可能,越来越多的企业引入了机械加工的自动化生产线^[1]。桁架机器人因具有可长距离输送、工作空间大、安装方便、控制容易、多用途等优点^[2],在自动化机械加工中得到了广泛的应用,而实现抓取功能的机械手爪,是桁架机器人的重要组成部分,一般由传动机构和机械手爪两部分组成。

目前,常见的工业机器人手腕一般采用摆动液压缸、摆动气缸、电机(伺服电机、步进电机)作为驱动元件。对于工业桁架机器人在某些特定的使用条件下,摆动液压缸虽然输出的扭矩较大,但是其维护和安装成本都比较高,且液压油可能导致环境污染的问题^[3];采用电机作为驱动元件,虽控制精确,但成本较高;摆动气缸采用清洁的压缩空气作为能源,安全可靠,但是由于摆动气缸内部的结构特点,其摆动块均位于摆动气缸的中间位置,所以摆动气缸在工作时占的空间体积较大,这就导致了在某些工况下,桁架机器人的竖梁在伸入机床或者物料系统抓取物件时会产生干涉现象^[4]。

气缸作为驱动元件,具有无害介质,成本低,结构简单等优点,在工业桁架机器人上应用较广。气缸的缸径决定了其所能输出力的大小,增大缸径可增加驱动力,但会增加耗气量,导致设备笨重。另外,借助扩力机构也是一种增加气缸输出力的大小的方法。本文设计了一种具有扩力效果的传动机构,在不增加气缸缸径和不改变气缸行程等前提下,只优化传动机构尺寸,使传力机构达到最佳的扩力效果,从而解决了未优化前摆动块的输出力矩不满足使用条件的问题。除此之外,该摆动手腕结构紧凑,工作时占用空间体积小,成本低,安装非常方便。

该传动机构由两个平行对称布置、反向驱动的气缸作输入,安装有双手爪的一个V字型摆块绕定点摆动,在两个位置上输出,形成一对偏置式的摆杆滑块机构,单只手爪可抓取物件的质量为4kg。

这种双手爪V字型摆动机械手具有上料时间短、效率高、可靠性高等优点。

1 结构组成及工作原理

1.1 结构组成

V字型摆动机械手的结构组成如图1所示。两机械手爪a,b安装在V字型的摆块5边上,气缸推杆1,2同时作反向运动,分别通过连杆3,4驱动摆块5克服抓取重力为 G (含摆块和手爪自重)的反力矩,使摆块5绕转动中心 O 摆动。摆块5转动 $\delta = 30^\circ$ 时,摆块将液压缓冲器触头6压至极限位置,保持此位置机构的转矩最大,并停留数秒时间用于工件抓放^[5-6]。

1.2 抓取过程及其工作原理

图2是机械手在加工过程中抓放及上下料的过程。

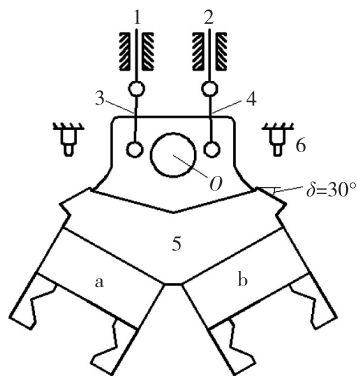


图1 V字型摆动机械手的结构组成

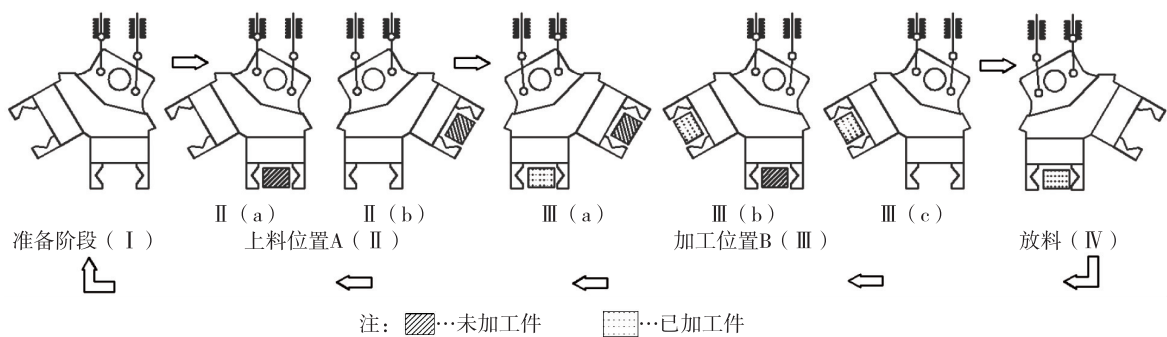


图 2 V 字型摆动机械手在抓放过程中的姿态

I 阶段:机械手转至抓取位置,准备从料道上抓取未加工件。

II 阶段:II(a)表示机械手在上料位置(A)抓取了一个未加工件,随后转至 II(b)位置,准备抓取机床上已加工件。

III 阶段:III(a)表示机械手随桁架机器人沿导轨移动到达机床加工位置(B),抓取了机床上已加工好的工件;随后机械手顺时针转动至位置 III(b),将未加工件放置在机床上,此时为图 III(c)所示。

IV 阶段:机械手转至该位置,并随着桁架机器人沿导轨 移动返回至料道位置 A 处,将已加工件放下。

随后从 I 阶段开始,重复上述这个过程。

1.3 机构描述及其简图

图 3 为处于非工作(对称)位置下的 V 字型机械手机构简图,它包含机架 0、气缸推杆 1 和 2、连杆 3 和 4 以及安装机械手爪的摆块 5。气缸推杆 1,2 分别和连杆 3,4 的连接点为 A' , D' , 其水平连线距转动中心 O 的垂直距离为 H_0 , 偏心距为 e 。设 $A'B' = C'D' = l$, $OB' = OC' = r$ 。其中,运动副 A' , B' , C' , D' 均为转动副。显然,该机构的自由度为 1,从确定运动角度来说,该传动机构仅需一个气缸,但为提高传力效果,用两个气缸协调施加作用力,以增大摆块 5 的输出力矩。

图 4 为机械手的抓取状态示意图, $\angle BOB' = 30^\circ$, $\beta_1 = \beta_0 - 30^\circ$, $\beta_2 = \beta_0 + 30^\circ$ 。设气缸推杆 1,2 分别向下、向上运动时,则摆块 5 绕 O 点逆时针摆动。

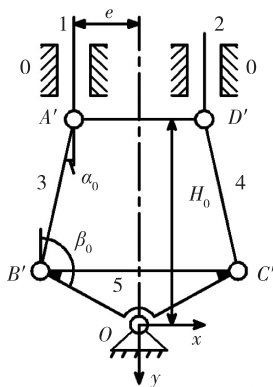


图 3 V 字型机械手的非工作状态

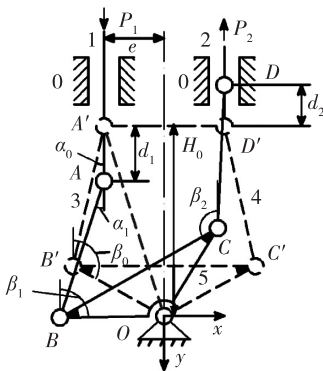


图 4 V 字型机械手的抓取状态

2 机构静力分析

因传动机构尺寸及运动范围较小、摆动速度不高,不考虑各运动副中的摩擦力、角加速度,以及气缸推杆 1 和 2 及连杆 3 和 4 的质量。

2.1 构件受力分析及转矩计算

设气缸 1,2 上的施力为 P_1, P_2 , 方向如图 4 所示。在摆动机械手抓取姿态, 构件 3,4 的受力为 F_3, F_4 , 分别如图 5(a)、图 5(b) 所示, 于是

$$F_3 = \frac{P_1}{\cos \alpha_1}; F_4 = \frac{P_2}{\cos \alpha_2}$$

而构件 5 的受力分析, 如图 5(c) 所示, 构件 5 除受到杆 3、杆 4 的作用力 F_3, F_4 外, 还受到抓取重力 (包括手爪自重) $G = mg$ 的作用。

于是, 气缸 1,2 所产生的转矩 M_1, M_2 分别为:

$$M_1 = F_3 \times h_1 = \frac{P_1 r \sin(\beta_1 - \alpha_1)}{\cos \alpha_1} \quad (1)$$

$$M_2 = F_4 \times h_2 = \frac{P_2 r \sin(\alpha_2 + \beta_2)}{\cos \alpha_2} \quad (2)$$

抓取重力 $G = mg$ 产生的反力矩, 为:

$$M_3 = G \cdot h_3 \quad (3)$$

由图 2 摆动机械手的工作姿态可以看出, 反力矩的计算分为 2 种情况, 如图 6 所示。图 6(a) 中, L 为转动中心 O 距手爪 a, b 的夹持中心 E 的距离, 由于手爪是对称结构, 故重心在对称中心处。在加工位置 B 中 III(a), III(b) 姿态下, 摆动机械手的总质量 m_1 (物件质量、手爪自重和摆动块自重的和) 为

$$m_1 = (4 \times 2 + 2.1) \text{ kg} = 10.1 \text{ kg}$$

这里取 L 的最大值 200mm, 于是该种情况下

$$M_3' = G_1 \cdot L \sin 30^\circ = 9.898 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

当手爪只抓有一个物件时, 此时重心不在对称中心处, 重心偏向抓有物件的那只手爪, 按最大力臂情况下计算, 如图 6(b)。该种情况下, 可认为重心在手爪 b 的对称中心处, L 为转动中心 O 距手爪 b 对称中心的距离且 $L = 200\text{mm}$, 那么, 该种情况下

$$M_3'' = G_2 \cdot L \sin 60^\circ = 10.354 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

综合 2 种情况, 取反力矩为 $10.354 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2.2 几何关系分析

首先, 由图 4, 易有如下几何关系:

$$r \sin \beta_1 - l \sin \alpha_1 = e \quad (4)$$

并令 $\lambda = r/l$, $\xi = e/l$, 则

$$\sin \alpha_1 = \lambda \sin \beta_1 - \xi$$

同理,

$$\sin \alpha_2 = \xi - \lambda \sin \beta_2$$

其次, 由 $\triangle A'B'O$:

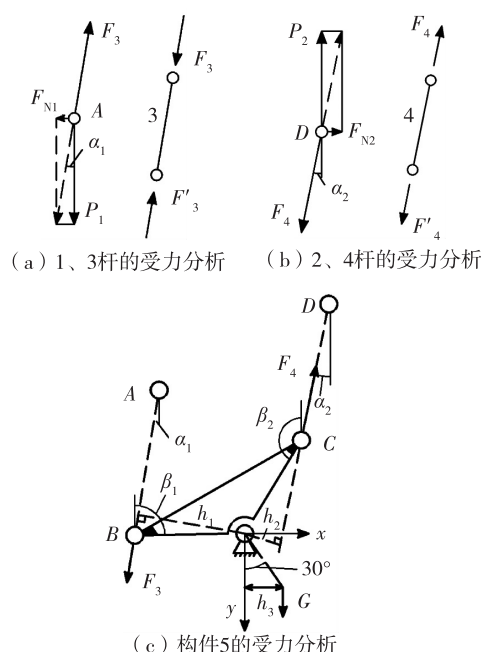


图 5 机构受力分析简图

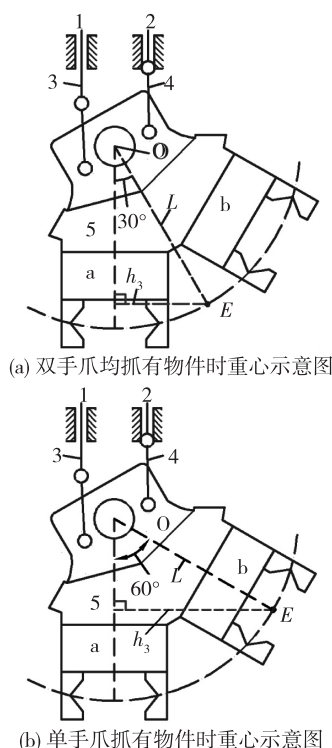


图 6 V 字型摆动机械手重心示意图

$$\cos(\beta_0 - \alpha_0) = \frac{l^2 + r^2 - A'O^2}{2lr} \quad (5)$$

其中, $A'O^2 = e^2 + H_0^2$, 由(4)式得

$$r \sin \beta_0 - l \sin \alpha_0 = e \quad (6)$$

联立(5)和(6)式, 解得

$$\sin \beta_0 = \frac{\sqrt{\left(\frac{2ec}{l} - \frac{2re}{l^2}\right)^2 - 4\left(\frac{r^2}{l^2} + 1 - \frac{2rc}{l}\right)\left(c^2 - 1 + \frac{e^2}{l^2}\right) - \frac{2ec}{l} + \frac{2re}{l^2}}{2\left(\frac{r^2}{l^2} + 1 - \frac{2rc}{l}\right)} \quad (7)$$

其中 $c = \frac{l^2 + r^2 - A'O^2}{2lr}$ 。

进一步, 有

$$\begin{cases} d_1 = H_0 + r \cos \beta_1 - l \cos \alpha_1 \\ d_2 = l \cos \alpha_2 - H_0 - r \cos \beta_2 \end{cases}$$

因此, 在图 2 的加工位置 B 中, 从抓取姿态 III(a) 到抓取姿态 III(b), 转动副 A (或 D) 所产生的位移为

$$d = d_1 + d_2 = r \cos \beta_1 - l \cos \alpha_1 + l \cos \alpha_2 - r \cos \beta_2$$

3 优化模型的建立及计算

3.1 优化模型的建立

3.1.1 确定目标函数

由式(1)和(2), 目标函数为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 = \frac{P_1 r \sin(\beta_1 - \alpha_1)}{\cos \alpha_1} + \frac{P_2 r \sin(\alpha_2 + \beta_2)}{\cos \alpha_2} \quad (8)$$

优化的目标是使机械手在抓取位置时, 摆块 5 的输出力矩最大, 即求目标函数(8)的最大值。

3.1.2 确定设计变量

根据(7)式及几何关系 $\beta_1 = \beta_0 - 30^\circ$ 和 $\beta_2 = \beta_0 + 30^\circ$ 可知, 目标函数(8)是关于连杆长度 l 和摆杆长度 r 的函数, 故设计变量为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ r \end{bmatrix}$$

3.2 确定约束条件

首先, 在实际结构中, 为避免在非工作状态下传动机构出现死点, 即图 4 中的点 A', B', O 不能在同一条直线上 (β_0 的值不能大于位于死点位置时的值), 当 A', B', O 在同一条直线上时, 出现死点时的角度 β_0' 的值为:

$$\beta_0' = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{e}{H_0}\right) \quad (9)$$

又根据结构要求, β_0 为钝角, 故约束

$$\frac{\pi}{2} < \beta_0 < \beta_0' \quad (10)$$

其次,图2中,从抓取姿态(3)到抓取姿态(4),转动副A(或D)所经历的位移不能超过气缸的行程范围,选用的气缸的行程为30mm,留4mm余量,故约束

$$d = r \cos \beta_1 - l \cos \alpha_1 + l \cos \alpha_2 - r \cos \beta_2 \leq 26 \quad (11)$$

最后,根据结构需要,设计变量的取值范围为

$$\begin{cases} 24 < r \leq 30 \\ 20 < l < 75 \end{cases} \quad (12)$$

这样,式(9)~式(12)构成约束条件。

3.3 优化计算及分析

已知参数: $H_0 = 44 \text{ mm}$,偏心距 $e = 20.5 \text{ mm}$, $A'O = \sqrt{e^2 + H_0^2}$,气缸在0.5MPa的空气压力下的推力为346.6N,拉力为290N。

求 \mathbf{M} 的最大值 \mathbf{M}_{\max} 与求 $-\mathbf{M}$ 的最小值等价,这里采用MATLAB软件中的优化函数fmincon函数^[7],进行优化计算,优化结果为:

$$x_1 = 44.3424, x_2 = 26$$

$$\mathbf{M}_{\max} = 14.287 (\text{N} \cdot \text{m})$$

即所产生的最大力矩为14.287N·m。

此时的安全系数为

$$k = \frac{14.287}{10.354} = 1.38 > 1.3$$

为了使设计的尺寸的可靠性更高,这里采取冗余设计的方法^[8-10],规定安全系数为1.3,故结果满足设计要求。

由 $l = 44.3424 \text{ mm}$, $r = 26 \text{ mm}$,即可求出其他参数:

$$\beta_0 = 90.05^\circ;$$

$$d_1 = 12.7035; d_2 = 13.2965$$

表1为摆动机械手的参数优化前后的对照,易知,优化前气缸所提供的力矩小于反力矩,故不能驱动摆动块至工作位置而造成机械手无法对工件进行准确抓取的后果,而优化后的输出转矩比优化前增大了47.3%,满足设计的安全系数(注:优化后系统中多余的力矩被液压缓冲器吸收)。

表1 传动机构参数优化前后对照

参数	连杆长度/mm	摆杆长度/mm	源力矩/(N·m)	反力矩/(N·m)
优化前	30	25	9.698	10.354
优化后	44.3424	26	14.287	10.354

由函数关系 $\mathbf{M} = f(\mathbf{d})$, $\mathbf{d} = d_1 + d_2$,利用MATLAB中的plot函数,以气缸位移 \mathbf{d} 为横坐标,力矩 \mathbf{M} 为纵坐标,绘制出输出力矩随气缸位移变化的关系图,如图7所示。

注:机械手处在非工作对称状态下,气缸推杆的位移为0,在 A', D' 水平线以上,运动副 A' (或 D')位移为正,在水平线以下位移为负。图7横坐标原点(0位置)表示构件5还未摆动,即图3所示姿态,此时系统力矩最大;原点右侧的横坐标对应 d_2 的值,原点左侧横坐标对应 d_1 的值,曲线末端的函数值即为机械手在抓取位置机构的总力矩,其值为14.287N·m。

优化后的双手爪摆动机械手,已在公司实际生产的工业桁架机器人上成功应用,图8为优化后传力

机构的试验样机。

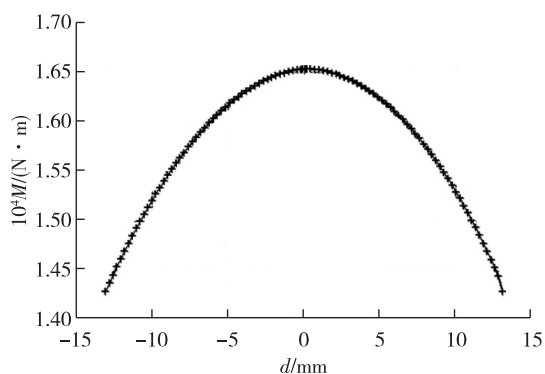


图7 目标函数随气缸位移变化



图8 传力机构的试验样机

4 结 论

设计并优化了一种安装于工业桁架机器人上、用于自动抓放及上下料的双手爪摆动机械手。

1)对机构进行了静力分析以及转矩计算,得到输入-输出力关系的解析式。

2)以摆杆、连杆长度为设计变量,以机械手位于抓取位置时摆块产生最大输出转矩为目标,采用MATLAB软件的优化算法,对传动机构进行优化,得到摆杆、连杆长度的最优值。在不改变气缸缸径和气缸行程等的前提下,优化摆杆和连杆尺寸,使气缸作用在摆动块上的力矩在约束条件内达到最大,避免了采取增大气缸缸径来增加摆动块源力矩的弊端。

3)优化后,双手爪摆动机械手可以摆动至抓取位置,对物料进行准确抓取,充分利用了驱动气缸的原动力,使其达到最大转矩输出。

参考文献:

- [1]周济.智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J].中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.
- [2]朱金权.桁架式机器人的机械设计与研究[J].中国新技术新产品,2014(9)(上):18-21.
- [3]周海强,陈道量.摆动液压缸内部结构改进设计[J].液压气动与密封,2007(6):32-34.
- [4]吴国雄.一种回转摆动气缸的典型应用及安装调试方法[J].机械工程师,2011(8):110.
- [5]郑文纬,吴克坚.机械原理[M].北京:高等教育出版社,1996:345-363.
- [6]李慧剑,杜国君.理论力学[M].北京:科学出版社,2009:73-98.
- [7]张燕.机械优化设计方法及应用[M].北京:化学工业出版社,2015:12-34,222-235.
- [8]孙怀义.冗余设计技术与可靠性关系研究[J].仪器仪表学报,2007,28(11):2089-2092.
- [9]孙薇薇,周虹.有效的冗余设计[J].可靠性设计与工艺控制,2008,26(3):47-50.
- [10]KIM J, PARK F, RYU S, et al. Design and analysis of a redundantly actuated parallel mechanism for rapid machining[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(4):423-434.

(责任编辑:李艳)