

# 工业机器人气缸活塞平衡系统的优化设计

黄 龙            康 建 陈宁新

(大连组合机床研究所机器人室) (北京航空航天大学机器人研究所)

**摘要** 本文对工业机器人的气缸活塞平衡系统进行了分析, 建立了一个实用而有效的气缸活塞平衡系统的优化设计方法。成功地研制了一平衡系统优化设计软件及较为直观的平衡效果显示系统。实际运算表明, 对平衡系统的安装尺寸及卸荷装置的参数进行优化, 可明显减少驱动力矩的幅值及其波动。

**关键词:** 平衡系统, 平衡力矩, 不平衡力矩, 偏重力矩。

## 1 引言

设计最佳的平衡系统是改善机器人工作性能的重要措施之一。设置平衡系统的主要目的是:

1) 降低机器人各臂杆自重而引起的静态偏重力矩。所谓静态偏重力矩即抓取物体(载荷)自重和各臂杆(包括驱动与传动系统)自重对不垂直于水平面的各关节轴线的重力矩。由于偏重力矩的存在, 使机器人臂杆对诸关节不能保持自身的平衡。此外, 由于机器人各关节的运动范围较大, 机器人在各个位置上具有不同的偏重力矩, 故过大的偏重力矩及波动对驱动力矩及驱动功率的影响是十分显著的。

2) 提高传动系统的寿命和精度。合理的平衡系统的设计将减小传动系统的静载荷, 从而减少传动部件的摩擦、磨损和变形。尤其在重载大尺寸情况下, 传动系统的寿命和精度将得到显著提高。

3) 使手把手示教机器人的示教工作轻松、灵活、准确, 即使示教轻动化。

现有的工业机器人平衡措施主要有下述四种。

1) 附加平衡重使机器人臂杆的重心落在驱动轴线上或附近<sup>(2)</sup>。该方法简单可靠并可获得完全平衡。尤其是可对臂杆、驱动系统和传动系统及驱动手腕自由度的电机等进行巧妙的布局, 利用电机的自重使其总质心离驱动轴线不远, 然后附加适当平衡重, 使其完全平衡。但该方法增加了本体的重量和惯性, 从而恶化了其动力学特性, 增加了后续臂杆平衡的难度。因此, 该类方法主要用于电机驱动的机器人小臂的平衡。

2) 附加弹簧平衡系统<sup>(2,3,5)</sup>。通过弹簧支点的相对位置变化储存或施放能量从而平衡偏重力矩。该法结构简单、保养方便、平衡性能较好。但当机器人载荷重量发生变化时, 弹簧刚度系数不能调整, 对平衡效果有一定影响。该法可用于各种类型中小载荷的工业机器人大小臂平衡。

3) 附加气缸平衡系统<sup>(1)</sup>。该方法的原理与弹簧平衡系统类似。其特点是结构紧凑, 承载能力大, 并可根据不同的工作载荷调整其平衡气缸气压。因此, 多用于重载型机器人的大臂平衡系统。

4) 附加平衡电机<sup>(4)</sup>, 即除了用驱动电机外, 另外在每个关节驱动轴上都附加用于专门平衡其偏重力矩的平衡电机。该方法效果最佳, 但由于增加了一倍的电机和控制系统, 因此尚未在工业机器人上广泛应用。

本文对工业机器人的气缸平衡系统进行了较为深入的研究, 并提供了一个有效的优化设计方法。与前人工作比较, 本文首次考虑了平衡气缸的结构设计参数气缸下备量  $q$  对平衡效果的影响, 并将其作为优化设计变量进行了改进优化设计。同时, 针对气缸的实际工作情况, 修正完善了平衡气缸的卸荷力矩模型, 从而获得了更为满意的平衡效果。在平衡效果的计算机显示方面, 采用三维图形并可任意旋转和截出平面曲线, 使机器人各力矩的分布特性在整个关节空间中表现得全面直观, 这有助于比较分析, 以寻求最佳的平衡效果。

## 2 气缸平衡系统优化模型的建立

图 1 所示为一典型五自由度关节型工业机器人, 由于该类机器人的腕部结构较为紧凑, 几何尺寸小, 难以设置平衡装置, 加之其重量相对大、小臂而言所引起的偏重力矩很小, 因此不在腕部附加平衡装置, 将其重量转化到小臂上统一考虑。

该类机器人小臂的平衡采用附加平衡重的方式, 将腕部驱动系统设置在小臂驱动轴线的另一端, 并附加适当的平衡重, 使小臂达到近似完全平衡。

其大臂的平衡采用气缸平衡系统, 具体分析如下。

### 2.1 偏重力矩 $T_G$

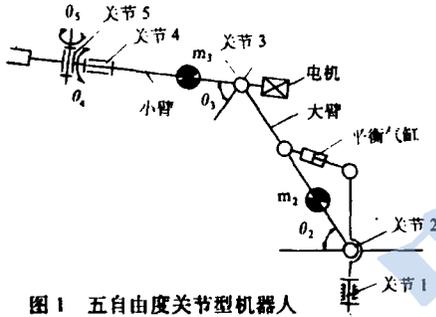


图 1 五自由度关节型机器人

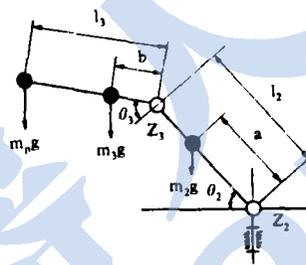


图 2 偏重力矩的推导

如图 2 所示, 机器人大小臂的杆长和重量分别为  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $m_2g$  和  $m_3g$ , 设其质心在臂杆的对称中心线上且与轴线  $Z_3$ 、 $Z_2$  的距离分别为  $a$  和  $b$ , 在小臂的端点作用有手部、腕部及载荷的质量  $m_p$ , 令各质量对轴  $Z_2$  的偏重力矩为  $T_G$ , 则有:

$$T_G = |m_2 \cdot g \cdot a \cdot \cos\theta_2 + m_3 \cdot g \cdot [l_2 \cdot \cos\theta_2 + b \cdot \cos(90^\circ - \theta_2 - \theta_3)] + m_p \cdot g \cdot [l_2 \cdot \cos\theta_2 + l_3 \cdot \cos(90^\circ - \theta_2 - \theta_3)]| \quad (1)$$

由于偏重力矩  $T_G$  是由铅垂方向的重力所引起的力矩, 无论其方向如何, 都将作为平衡的目标。因此, 为了计算方便和力矩图形显示了, 规定  $T_G$  的方向恒为正值。

### 2.2 卸荷力矩 $T_{re}$

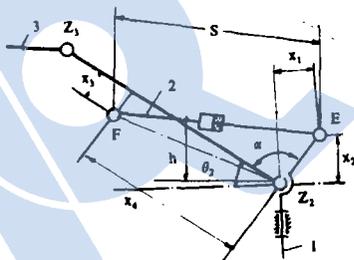


图 3 卸荷力矩的推导

如图 3 所示, 平衡气缸的安装参数如下。气缸活塞杆的下销以转动副与腰部(杆 1)上的点  $E$  相联, 气缸的上销与大臂(杆 2)上的一点  $F$  以转动副相联。  $E$ 、 $F$  两点相对于  $Z_2$  轴与杆 2 中心线的距离尺寸分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ , 点  $E$ 、 $F$  之间的距离为  $s$ , 则气缸在一定气压下产生的压力  $F$  对轴  $Z_2$  的力矩——气缸的卸荷力矩  $T_{re}$  为:

$$T_{re} = F \cdot h \quad (2)$$

式中  $h$  为  $Z_2$  轴到气缸压力  $F$  作用线的垂直距离。同样的理由, 规定若卸荷力矩  $T_{re}$  的方向与偏重力矩  $T_G$  相反, 则无论其为顺时针还是逆时针方向, 均取正值, 反之取负值。气缸力  $F$  的大小是随气缸的体积即活塞位置变化而变化的。

$$F = p_0 \cdot A [(s_1 - s_0 + q) / (s_1 + q - s)]^\alpha - p_{大气} \cdot A' \quad (3)$$

式中,  $A$  为气缸的有效截面积,  $A'$  为气缸截面积,  $p_0$  为气缸的初始压力,  $p_{大气}$  为大气压力,  $s_0$  为点  $E$  与  $F$  之间的初始距离,  $s_1$  为  $E$ 、 $F$  两点间最大距离,  $q$  为气缸的下备量,  $\alpha$  为绝热指数, 一般选为 1.4。

由于卸荷气缸配有限压阀(安全阀), 当气缸压力达到限定压力时, 限压阀打开, 此时缸内气

压保持在限定压力值。令限压阀压力为  $p_{\max}$ ，则此时

$$F = p_{\max} \cdot A - p_{\text{大气}} \cdot A' \quad (4)$$

据三角形余弦定理

$$s = [x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - 2 \cdot \sqrt{(x_1^2 + x_2^2) \cdot (x_3^2 + x_4^2)} \cdot \cos\alpha]^{1/2} \quad (5)$$

故

$$s_0 = [x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - 2 \cdot \sqrt{(x_1^2 + x_2^2) \cdot (x_3^2 + x_4^2)} \cdot \cos\alpha_0]^{1/2} \quad (6)$$

$$s_1 = [x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - 2 \cdot \sqrt{(x_1^2 + x_2^2) \cdot (x_3^2 + x_4^2)} \cdot \cos\alpha_1]^{1/2} \quad (7)$$

式中， $\alpha$  为线  $EZ_2$  和  $Z_2F$  之间的夹角， $\alpha_0$  为初始位置 ( $\theta_2 = 90^\circ$ ) 时的  $\alpha$  角， $\alpha_1$  为大臂极限位置 ( $\theta_2 = \theta_{2\min}$ ) 时的  $\alpha$  角。而

$$h = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2) \cdot (x_3^2 + x_4^2)} \cdot \sin\alpha / s \quad (8)$$

将(3)–(8)式依次代入(2)式，即可求得卸荷力矩  $T_{re}$ 。

### 2.3 目标函数

设置气缸平衡系统的目的是使各驱动轴的偏重力矩能被卸荷力矩完全或部分平衡。

令不平衡力矩为  $T_e$ ，则

$$T_e = T_G - T_{re} \quad (9)$$

由于偏重力矩  $T_e$  与杆 2 和杆 3 的转角  $\theta_2$  和  $\theta_3$  有关，而卸荷力矩  $T_{re}$  仅与杆 2 转角  $\theta_2$  有关，故气缸平衡系统不能使  $T_e$  在机器人整个运动空间内都等于零。因此，需采用优化设计方法，使  $T_e$  在整个运动期间最小。同时为了减小驱动力矩的波动而使运动更加平稳，本文选取的目标函数包含以下两个子目标：

- 1) 最小的最大不平衡力矩  $T_{e\max}$ ；
- 2) 最小的不平衡力矩波动，即最大不平衡力矩与最小不平衡力矩  $T_{e\min}$  之差。

即：

$$f(\bar{x}) = \omega_1 T_{e\max} + \omega_2 (T_{e\max} - T_{e\min}) \quad (10)$$

其中， $\omega_1$  与  $\omega_2$  是加权因子，一般取  $\omega_1 = \omega_2 = 1$ 。而

$$T_{e\max} = \max(T_G - T_{re}) \quad (11)$$

$$T_{e\min} = \min(T_G - T_{re}) \quad (12)$$

### 2.4 设计变量

由求  $T_{re}$  的(2)式可知，除运动参数  $\theta_2$  和  $\theta_3$  外，影响卸荷力矩的参数有：气缸的上下销安装尺寸  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_4$ ，以及气缸的初始压力(供气压力)  $p_0$ ，气缸的下备量  $q$ ，气缸的有效截面积和限压阀的极限压力等参数。由于气缸内壁直径和限压阀压力值已系列化，只能选取一些不连续的定值，故不便作为优化变量，因此需在优化之前，根据原设计或设计经验选取定值输入。

为此，将余下的六个参数选为优化参数，即优化变量  $\bar{X}$  为：

$$\begin{aligned} \bar{X} &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \\ &= [x_1, x_2, x_3, x_4, p_0, q]^T \end{aligned} \quad (13)$$

### 2.5 约束条件

根据气缸平衡系统结构上的可能性，以及实际安装尺寸和参数的大小，取六个变量的上下界作为边界约束 ( $x_{i\min}$ ,  $x_{i\max}$ )， $i=1-6$ 。其中  $i=1-4$  前四个约束限定了气缸上、下销的安装范围， $i=5$  限定了供气压力范围， $i=6$  限定了气缸总长范围。

### 3 优化方法及程序设计

本大臂气缸平衡系统的优化设计所选用的优化方法为混合罚函数方法，该法是一种 SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique) 法的内点和外点罚函数的组合法。对于不等式约束  $g_i(\bar{X})$  用内点法构造惩罚项，对于等式约束  $h_i(\bar{X})$  用外点法构造惩罚项。

本优化方法的优化程序主要计算流程如图 4 所示。

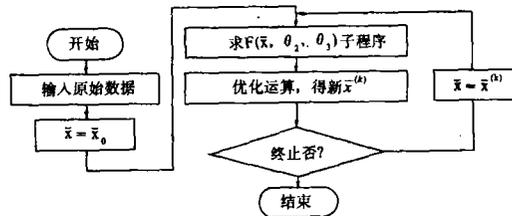


图 4 优化程序主要计算流程

#### 4 ZHS-R005 弧焊机器人气缸平衡优化实例

以大连组合机床研究所研制的 ZHS-R005 型五自由度弧焊机器人大臂气缸平衡系统为例, 对其进行了改进设计。该机器人的各类参数如下。

##### 4.1 ZHS-R005 机器人的结构参数

$l_2 = 0.65\text{m}$ ;  $l_3 = 0.65\text{m}$ ;  $a = 0.325\text{m}$ ;  $b = 0.18\text{m}$ ;  $\theta_{2\min} = 30^\circ$ ;  $\theta_{2\max} = 150^\circ$ ;  $\theta_{3\min} = -55^\circ$ ;  $\theta_{3\max} = 55^\circ$ ;  $m_{p\max} = 12\text{kg}$ ;  $m_{p\min} = 0\text{kg}$ ;  $m_2 = 94.5\text{kg}$ ;  $m_3 = 75\text{kg}$ ;  $p_{\max} = 5.5\text{kgf/cm}^2$ 。

##### 4.2 设计变量 $\bar{x}$ 的约束条件

$0 < x_1 < 0.5\text{m}$ ;  $0 < x_2 < 0.5\text{m}$ ;  $0 < x_3 < 0.5\text{m}$ ;  $0 < x_4 < 0.6\text{m}$ ;  $0 < x_5 < 5.5\text{kgf/cm}^2$ ;  $0 < x_6 < 0.05\text{m}$ 。

##### 4.3 设计变量 $\bar{x}$ 的初始值

优化设计变量的初始值  $\bar{x}_0$  采用该机器人现有气缸平衡系统的参数。

$$\bar{x}_0 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.15 \\ 0.00 \\ 0.44 \\ 4.00 \\ 0.0056 \end{bmatrix}$$

##### 4.4 优化前后平衡效果比较

经编程上机运算, 得到气缸平衡系统的优化值。现将优化前后设计变量的参数尺寸列于表 1 中; 优化前后的不平衡力矩值列于表 2 中。

表 1 优化前后的参数

参数	$x_1(\text{mm})$	$x_2(\text{mm})$	$x_3(\text{mm})$	$x_4(\text{mm})$	$x_5(\text{kgf/cm}^2)$	$x_6(\text{mm})$
优化前	0.0	150.0	0.0	440.0	4.0	5.6
优化后	21.5	242.3	25.22	523.78	3.58	34.96

表2 优化前后的不平衡力矩

量值	$T_{emax}(N \cdot m)$	$T_{emin}(N \cdot m)$	$T_{emax}-T_{emin}(N \cdot m)$
优化前	407.99	-127.10	535.09
优化后	78.64	-339.35	417.99

令优化设计后目标函数的相对下降率  $m_r$  作为综合衡量平衡效果的参数, 即

$$m_r = |(fx_1 - f^* x_1) / fx_1| \quad (14)$$

式中,  $fx_1$  为优化前的目标函数值,  $f^* x_1$  为优化后的目标函数值.

$$fx_1 = T_{emax}^0 + (T_{emax}^0 - T_{emin}^0) \quad (15)$$

$$f^* x_1 = T_{emax}^* + (T_{emax}^* - T_{emin}^*) \quad (16)$$

将具体数值代入以上三式, 得  $m_r = 47.3\%$ . 为了更加全面地比较优化前后的平衡效果, 令优化前后最大不平衡力矩的相对下降率和不平衡力矩波动幅值的相对下降率分别为  $m_r'$  和  $m_r''$ , 即

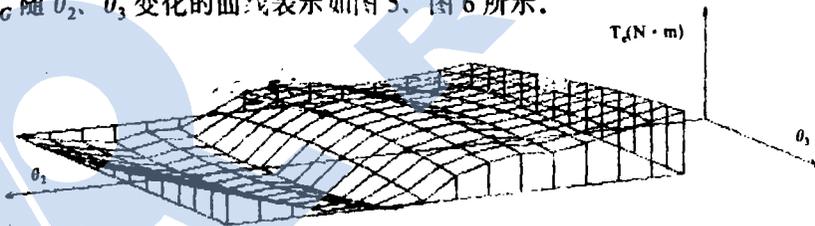
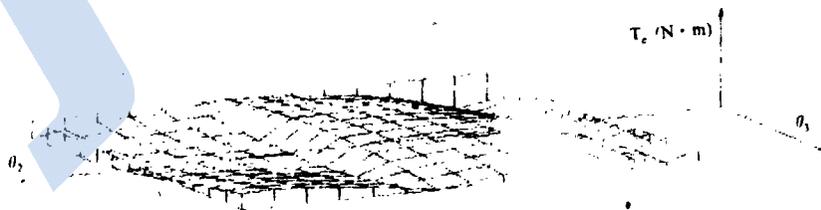
$$m_r' = (|T_e|_{max}^0 - |T_e|_{max}^*) / |T_e|_{max}^0 \quad (17)$$

$$m_r'' = [(T_{emax}^0 - T_{emin}^0) - (T_{emax}^* - T_{emin}^*)] / (T_{emax}^0 - T_{emin}^0) \quad (18)$$

将上述具体数值代入得  $m_r' = 16.82\%$ ;  $m_r'' = 21.88\%$ , 上两式表明 ZHS-R005 型机器人气缸平衡系统经改进设计后, 驱动力矩下降了 17% 左右, 驱动力矩的波动下降约 22%, 使大臂平衡效果得到了较大的改善.

#### 4.5 优化前后不平衡力矩的分布比较

偏重力矩  $T_G$ , 卸荷力矩  $T_{re}$  和不平衡力矩  $T_e$  均分别随关节转角  $\theta_2$  和  $\theta_3$  的变化而变化, 为了更为直观地反映各种力矩随  $\theta_2$  和  $\theta_3$  变化的分布情况, 本平衡系统优化设计软件对以上各力矩采用三维计算机图形显示, 并可任意旋转和截出平面曲线. 限于本文的篇幅, 在此仅将优化前后不平衡力矩  $T_e$  随  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  变化的曲线表示如图 5、图 6 所示.

图5 优化前重载时  $T_e$  曲面图6 优化后重载时  $T_e$  曲面

观察以上  $T_e$  曲面可知, 优化前的不平衡力矩主要分布在关节运动范围中间, 即工作空间中最有效的使用区域, 这显然不合理, 而优化后的不平衡力矩主要分布在关节转角的极限区附近,

工作空间中间不平衡力矩较小。因此该结果不但使不平衡力矩从量值与波动方面下降,且其分布也较为合理。

## 5 结论

本文对工业机器人中广泛应用的气缸平衡系统进行了较为深入的分析,提出了该平衡系统的优化模型,编制了一个有效的优化程序和一个较好的优化结果图形显示系统。用该优化设计软件对一实际应用的弧焊机器人气缸平衡系统进行了改进优化设计,结果使其目标函数值约下降47%。证明本文的优化方法是一个可靠有效的气缸平衡系统优化设计方法。

## 参 考 文 献

- 1 Osyczka A *et al.* Optimal design of a relief mechanism of industrial robot. Proc 15th ISIR 1985: 439-444
- 2 路同俊. 关节型工业机器人臂杆平衡问题. 哈尔滨工业大学学报, 1987;(5): 73-79
- 3 赵锡芳, 张宗明. 机器自重平衡装置计算. 上海交大机械设计与研究, 1985;(5): 37-43
- 4 Arai Tatsuo *et al.* Development of driven-drive human-like manipulator. Proc 15th ISIR 1985: 447-454
- 5 Mahalingan S, Sharan A M. The optimal balancing of robotic manipulator. Proc of IEEE International Conference, 1986: 828-835
- 6 古德文 A B. 流体动力学. 煤炭工业出版社, 1980
- 7 万耀青, 梁庚荣. 最优化计算方法常用程序汇编, 工人出版社, 1983

# OPTIMAL DESIGN OF INDUSTRIAL ROBOT PISTON BALANCING SYSTEM

HUANG Long

KANG Jian

CHEN Ningxin

(Dalian Modular Machine Tool Research Institute) (Robotics Research Institute of A A, Beijing)

## Abstract

In this paper, based on theoretical analysis an efficient and practical optimal design method of industrial robot piston balancing system is developed and a successful optimal design software is created, which contains a three dimensional intuitive showing system of balancing results. As shown by our results the optimal balancing system parameters are slightly changed but the fluctuations and the maximum values of unbalancing torques are greatly reduced.

**Keywords:** balancing system, balancing torque, unbalancing torque, gravity torque.

工业机器人手册 = Промышленные роботы: Справочник [著、俄] / Козырев Ю.Г. - М.: Машиностроение, 1988. - 392р. 北京图书馆索书号 3-89 / TP242.2-62 / K593 = 2

本手册用大量图表和资料展示了苏联及美、法、日、意、捷、匈、波等国家生产的机器人、机器人系统及其配套部件的结构工艺参数,提供了它们的使用指南,以及建立和推广有工业机器人操作的自动化生产体系的有关数据。全书共6章,除了对工业机器人的术语、定义和分类作简单叙述外,着重介绍了各种工业机器人的结构和技术特性;工业机器人的配套产品(夹紧装置、拖动和自动化元器件、控制系统和信息系统等);各种用途的工业机器人(铸造、锻造、热处理、金属切削、装配、焊接、喷漆、电镀及工件运输等);与机器人使用有关的问题(安全、试验方法、验收、生产准备等)。最后还提供了设计机器人所需的有价值的资料。书后有主题词索引。

(张舜华)