

# 工业机器人结构与控制耦合的集成设计方法

白克强<sup>1</sup>, 刘知贵<sup>1</sup>, 王营通<sup>2</sup>

1. 西南科技大学信息工程学院, 绵阳 621010

2. 西南科技大学城市学院, 绵阳 621000

**摘要** 针对工业机器人伺服系统结构和控制分离设计误差较大的问题, 提出一种基于结构-控制耦合的集成设计方法。以结构重量、跟踪精度和控制能量指标为目标函数, 以稳定和快速跟踪性能指标为约束, 同时考虑结构与控制的耦合, 采用分步迭代策略消减误差, 以实现工业机器人工作在最佳状态的目标。以两关节机器人设计为例进行MATLAB仿真实验, 结果表明, 应用基于结构-控制耦合的集成方法设计, 伺服系统具有较好的鲁棒性, 在时间调整、超调量消除、阶跃动态响应能力等方面均优于分离设计, 使机器人的综合性能达到最优。

**关键词** 工业机器人; 结构与控制; 耦合; 伺服系统; 集成设计

工业机器人在各种工业生产中越来越多地替代人类工作, 人们对其工作效率和精度要求越来越高。因此, 从根本上提高机器人工作效率和精度, 就显得十分必要而且有很重要的实际应用价值。工业机器人在作业工程中的高性能实现, 需要对机械结构和控制系统进行精密的设计, 其中主要是对机器人的结构与控制系统的机电集成设计。结构与控制集成设计最早始于20世纪80年代<sup>[1]</sup>, 国内外学者进行了卓有成效的研究。文献[2]详细描述了结构与控制的集成设计的3个主要方面, 分别从空间机器人系统、直流电机以及机构系统中的控制和机构并行等问题进行了分析研究。然而, 这些研究均是在制造业系统进行研究和报道<sup>[3-4]</sup>, 而机器人行业目前主要集中在控制系统集成<sup>[5-9]</sup>、功能模块子系统集成<sup>[10-12]</sup>、移动机器人机构和机器人本体系统集

成<sup>[13-15]</sup>等。作为工业机器人控制系统的机电耦合问题比较突出, 其准确性及快速性取决于机电一体化设计。机械结构的成功设计与否将直接影响能否实现控制性能指标, 反过来, 控制性能又会影响机械结构的设计。例如, 伺服控制带宽的实现依赖于结构的固有频率, 而伺服系统驱动力的大小影响机器人基座结构的设计。因此, 为了使机器人工作在最优状态进行精密加工, 需要对其结构和控制进行集成优化设计。

机器人控制器是机器人工作的大脑指挥中心, 机械结构则是其执行机构, 一般在设计时都是以控制器为重点, 以伺服系统为中心, 将结构和控制分离进行单独设计, 形成模块化, 然后组装在一起经过调校达到要求的指标。实际中, 伺服系统往往不是最佳工作状态, 在伺服系统特别是在高性能的伺服系统中, 结构和控

收稿日期: 2017-10-09; 修回日期: 2018-04-16

基金项目: 四川省科技厅科技支撑项目(2015FZ0091); 西南科技大学博士研究基金项目(17ZX7157)

作者简介: 白克强, 博士, 研究方向为机器人、计算机应用技术及数学建模, 电子信箱: baikeqiang@swust.edu.cn; 刘知贵(通信作者), 教授, 研究方向为控制理论及计算机应用技术, 电子信箱: liuzhigui@swust.edu.cn

引用格式: 白克强, 刘知贵, 王营通. 工业机器人结构与控制耦合的集成设计方法[J]. 科技导报, 2018, 36(9): 91-96; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.09.012

制具有高度的耦合性。因此,本文以工业机器人最佳工作状态为目标,研究一种基于结构与控制耦合的机器人伺服系统集成设计方法。

## 1 机械臂伺服系统结构优化

机器人机械臂所能完成的任务随特定结构优化的不同而有很大的区别,结构优化的目的是为了满足不同跟踪性能要求。尽管通常把机械臂抽象成一个实体,但是它所能完成的任务主要受负载能力、运动速度、工作空间、可重复定位精度等实际因素的限制。为得到优良的伺服跟踪性能,首先需要考虑那些对结构优化影响最大的因素,然后再考虑其他细节问题。最终目的希望机械部分小巧而且灵活,所以需要对其结构进行优化,即对操作臂的尺寸、关节数目、关节布局等进行优化,在保证刚度和柔性要求的情况下达到总质量最小。

由于机器人机械臂的特殊性和复杂性,其动力学和运动学受到很多因素的影响,基于任务要求的优化会因为工作任务的不同而有很大变化,因此可将机械臂看成多工况的结构优化问题。机械臂伺服系统结构优化参数及要素如图1所示。

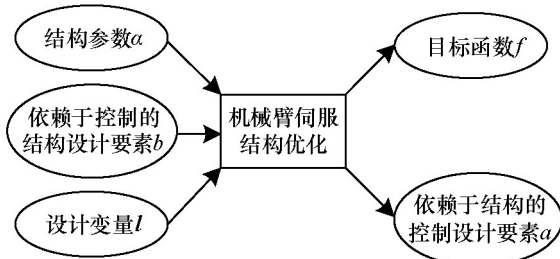


图1 机械臂伺服系统结构优化

Fig. 1 Structural optimization of manipulator servo system

结构设计变量的求解公式为

$$l = (l_1, l_2, \dots, l_n)^T \quad (1)$$

式中, $l_i$ 为机械臂伺服系统结构的第*i*个设计变量; $n$ 为设计变量总数。

目标函数表示为

$$f(\alpha, b, l) = \sum_{i=1}^m V_i \rho_i \quad (2)$$

式中, $\alpha$ 、 $b$ 分别为结构参数(如机械臂的尺寸、关节的数目、关节的布局等)和依赖于控制的结构优化要素(如驱动器和传感器); $m$ 为机器人机械臂伺服结构部件的

数目; $V_i$ 为第*i*个部件体积; $\rho_i$ 为第*i*个部件密度。

结构限制用于第一固有频率的基本结构时,频率的实际值 $\geq$ 最小容许值,应力的实际值 $\leq$ 最大容许值,位移的实际值 $\leq$ 最大容许值,并且还需要满足机器人机械臂的动力学方程<sup>[6]</sup>,即

$$M(\theta) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + h\left(\theta, \frac{d\theta}{dt}\right) \frac{d\theta}{dt} = \tau(t) \quad (3)$$

式中, $M(\theta)$ 为 $n \times n$ 惯性矩阵; $\theta$ 为 $n$ 维广义坐标向量; $d\theta/dt$ 为关节速度矢量; $h(\theta, d\theta/dt)$ 为哥氏力、离心力、黏性摩擦、重力项之和的 $n$ 维向量; $\tau(t)$ 为 $n$ 维广义力向量。

对输入施加如下约束条件

$$\tau_{i \min} \leq \tau_i \leq \tau_{i \max} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

通过对上述非线性规划问题的求解,可得到依赖于结构的控制设计要素(包括 $M(\theta)$ 、 $h(\theta, d\theta/dt)$ 、 $\tau(t)$ 等)和设计变量的最优值,作为控制增益优化的基础。

## 2 机械臂伺服系统控制优化

当操作臂的总体运动学结构确定后,下一步要考虑的最重要且最难的问题就是各个关节的驱动方式。通常,驱动器、减速装置、传动装置是密切相关的,所以要使控制达到稳、快、准的性能要求,必须综合考虑以上3种装置的布局 and 方式。

在控制系统优化时,一般希望操作臂关节能按照预先要求运动,伺服驱动则按照扭矩进行工作,这种控制系统通常是利用传感器进行的闭环反馈。一般情况下,保持稳定是系统的必要条件,在稳定的基础上才能扩展准确性和快速性。

机器人控制系统的反馈关系如图2所示,其中 $q_d$ 为期望轨迹函数, $q$ 为实际轨迹函数, $q_d'$ 和 $q_d''$ 分别为期望轨迹速度和加速度。

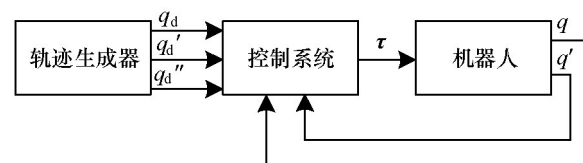


图2 机器人控制系统反馈关系

Fig. 2 Feedback block diagram of the robot control system

利用关节传感器的反馈,控制系统就能够根据伺服误差函数计算驱动器需要的扭矩。对于机器人复杂的系统,一般把控制器分为基于模型的控制部分和伺服控制部分,基于模型的控制部分将系统简化为一个单位质量系统,这样伺服控制部分的优化就仅需要选择增益。机械臂伺服系统控制增益优化参数及要素如图3所示。

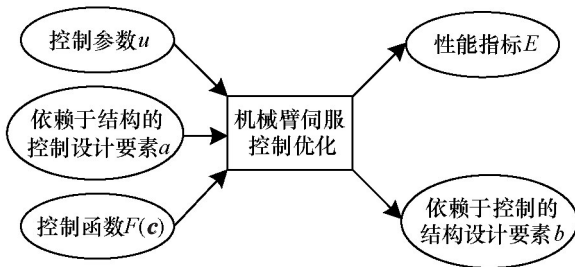


图3 机械臂伺服系统控制增益优化

Fig. 3 Optimization of servo system control gain of manipulator

控制增益的求解公式为

$$c = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T \quad (5)$$

式中,  $c_i$  为控制增益的第  $i$  个设计变量;  $n$  为控制增益设计变量总数。

目标函数为

$$\min E(u, a, F(c)) = \int_0^x e^2(t) dt \quad (6)$$

式中,  $E$  反映了对跟踪性能“快”与“准”的要求;  $\chi$  为周期;  $e^2(t)$  为误差。

对操作臂进行控制优化时,在式(3)的基础上加进一个摩擦模型  $f(\theta, d\theta/dt)$  (或者其他非刚体效应)。假设这个摩擦模型是关节的位置和速度的函数,则有

$$M(\theta) \frac{d^2\theta}{dt^2} + h\left(\theta, \frac{d\theta}{dt}\right) \frac{d\theta}{dt} + f\left(\theta, \frac{d\theta}{dt}\right) \frac{d\theta}{dt} = \tau(t) \quad (7)$$

对于式(7)所描述的复杂控制系统,利用控制器分解法<sup>[16]</sup>求解,有

$$\tau = \varphi\tau' + \gamma \quad (8)$$

式中,  $\tau$  为  $n \times 1$  关节力矩矢量。选择

$$\varphi = M(\theta) \quad \gamma = h\left(\theta, \frac{d\theta}{dt}\right) + f\left(\theta, \frac{d\theta}{dt}\right) \quad (9)$$

以及控制律

$$\tau' = \frac{d^2\theta_d}{dt^2} + K_v \frac{d\theta_d}{dt} + K_p e \quad (10)$$

式中,  $K_v$ 、 $K_p$  为常数对角阵;  $e = \theta_d - \theta$ 。

由式(7)~(10)可以求出伺服系统闭环特性的误差方程。

### 3 机械臂伺服系统集成优化

在伺服结构优化和伺服控制增益优化的基础上,对机械臂伺服系统进行结构与控制的集成设计,即通过寻找综合性能指标确定结构设计变量和控制增益的最优值。机械臂伺服系统集成优化参数、指标及变量如图4所示。

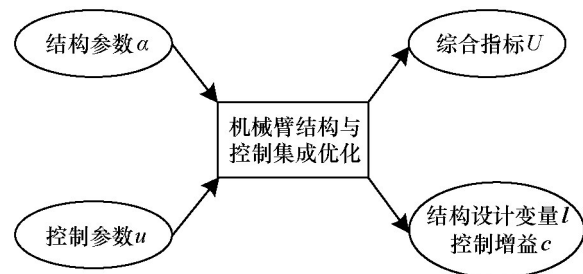


图4 机械臂伺服系统集成优化

Fig. 4 Integrated optimization design of manipulator servo system

结构设计变量和控制增益的求解公式为

$$p = (l_1, l_2, \dots, l_n; c_1, c_2, \dots, c_m)^T \quad (11)$$

目标函数为

$$\min U = \varepsilon_1 \sum_{i=1}^m V_i \rho_i + \varepsilon_2 \int_0^x e^2(t) dt \quad (12)$$

式中,  $0 \leq \varepsilon_1 \leq 1, 0 \leq \varepsilon_2 \leq 1$ , 且  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1$ 。

对于集成设计,可将结构约束看作一般问题,以减少结构性约束指标,构成最佳结构;可将增益约束看作普遍问题,以最大限度地减少控制性约束指标,构成最佳增益。优化的结构设计问题和控制设计问题最优增益之间的关系是相互依存的,所以必须充分考虑结构设计所依赖的控制性能指标和控制设计所依赖的结构参数。

机械臂结构动力学伺服系统的结构设计和集成控制增益的优化问题,可以采取分步迭代策略来解决。为了简化算法,考虑当忽略重力和外加干扰时,其动力学方程为式(3),可采用独立的PD进行控制。使系统在满足所要求的性能指标的前提下具有总体最优的性能,其控制律为

$$\tau' = K_d \frac{de}{dt} + K_p e \quad (13)$$

取跟踪误差为  $e = \theta_d - \theta$ ,采用定点控制时,  $\theta_d$  为常值,则

$$\frac{d\theta_d}{dt} = \frac{d^2\theta_d}{dt^2} \equiv 0$$

机器人的动力学方程则为

$$M(\theta)\left(\frac{d^2\theta_d}{dt^2} - \frac{d^2\theta}{dt^2}\right) + h\left(\theta, \frac{d\theta}{dt}\right)\left(\frac{d\theta_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt}\right) + K_d \frac{d\theta}{dt} + K_p e = 0 \quad (14)$$

式中

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} p_1 + p_2 + 2p_3 \cos \theta_2 & p_2 + p_3 \cos \theta_2 \\ p_2 + 2p_3 \cos \theta_2 & p_2 \end{bmatrix}$$

$$h\left(\theta, \frac{d\theta}{dt}\right) = \begin{bmatrix} -p_3 \frac{d\theta_2}{dt} + \sin \theta_2 & -p_3 \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \frac{d\theta_2}{dt}\right) \sin \theta_2 \\ p_3 \frac{d\theta_1}{dt} + \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix}$$

以双关节机器人为例进行仿真分析。双关节机器人的D-H坐标如图5所示。

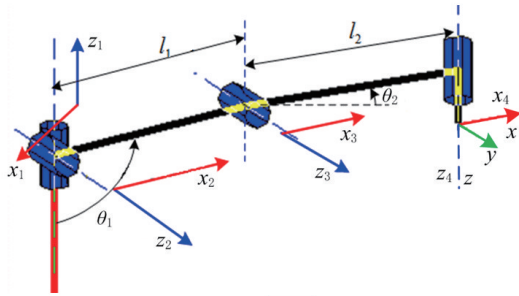


图5 机械臂D-H参数坐标

Fig. 5 Coordinates of D-H parameters of a manipulator

轴2和轴3的力矩方程分别为

$$\tau_2 = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2] \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + [m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2] \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + c_1 \frac{d\theta_1}{dt} - \quad (15)$$

$$(2m_2l_1l_2 \sin \theta_2) \frac{d\theta_1}{dt} \frac{d\theta_2}{dt} - (m_2l_1l_2 \sin \theta_2) \left(\frac{d\theta_2}{dt}\right)^2 + [(m_1 + m_2)gl_1 \sin \theta_1 + m_2l_2g \sin(\theta_1 + \theta_2)]$$

$$\tau_3 = (m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2) \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + m_2l_2^2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + (m_2l_1l_2 \sin \theta_2) \left(\frac{d\theta_1}{dt}\right)^2 + c_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + m_2gl_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (16)$$

式中,  $p_1=(4/3)m_1r_1^2+m_2l_1^2$ ,  $p_2=(4/3)m_2r_2^2$ ,  $p_3=m_2r_2l_1$ ;  $p_1$ 、 $p_2$ 分别为机械臂  $L_1$  和  $L_2$  的转动惯量;  $m_1$ 、 $m_2$  分别为机械臂  $L_1$  和  $L_2$  的质量;  $l_1$ 、 $l_2$  分别为机械臂  $L_1$  和  $L_2$  的杆长;  $r_1$ 、 $r_2$  分别为连杆连接点 1、2 到机械臂  $L_1$  和  $L_2$  的质心的距离;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为机械臂  $L_1$  和  $L_2$  的角度位置。

仿真参数取值分别为:  $m_1=0.765$  kg,  $m_2=0.765$  kg,  $l_1=0.25$  m,  $l_2=0.25$  m,  $r_1=0.15$  m,  $r_2=0.15$  m; 取  $p=[2.80$  0.74 0.85 3.04 0.85]<sup>T</sup>,  $\theta_0 = d\theta_0/dt = [0 \ 0]^T$ ; 位置指令为  $\theta_p(0)=[1.0 \ 1.0]^T$ 。式(13)中,取

$$K_p = K_d = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

双关节机器人设计仿真结果如图6~图9所示。图6为双关节机器人在运动过程中,关节1和关节2的位置跟踪阶跃响应变化曲线,可以看出关节1的响应时间比关节2短,两者均无超调,都在1 m处达到稳定状态。图7为关节1和关节2的PD控制输入响应变化曲线,可以看出关节1的PD控制输入变化比关节2大,响应时间2个关节基本相同,原因是关节1在运动中作为大臂离基座更近,运动相对稳定。图8和图9分别为初始值相同而加入前馈后选择不同鲁棒跟踪边界的阶跃响应变化曲线。从图8可以看出,鲁棒跟踪边界选择不合适,导致阶跃响应的跟踪精度没有得到提高。而图9

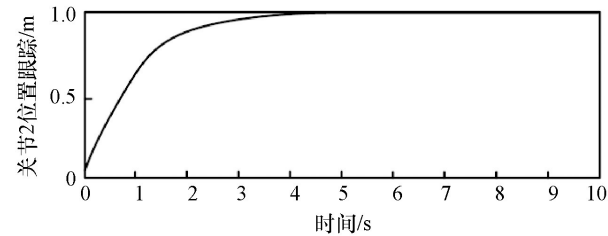
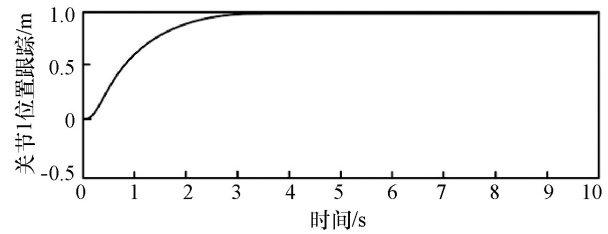


图6 双关节的阶跃响应

Fig. 6 Step response of double joints

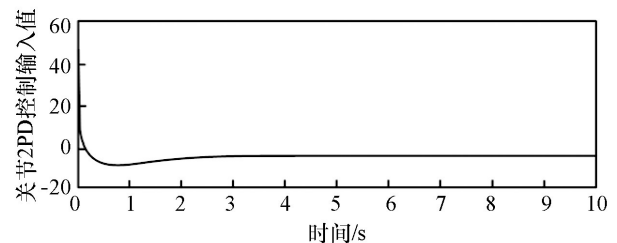
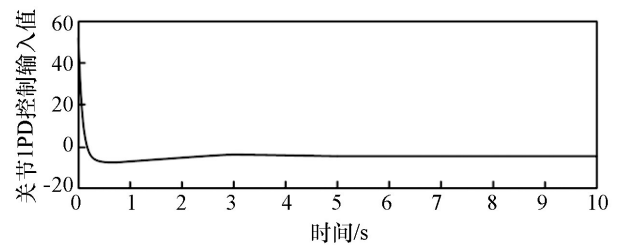


图7 PD控制的输入响应

Fig. 7 Input response of PD control

则选择了合适的跟踪边界,消除了超调,使阶跃的动态响应能力得到明显提高。集成设计与分离设计的仿真结果比较如图10所示,可以看出集成设计的调整时间、超调量以及稳定状态均优于分离设计。

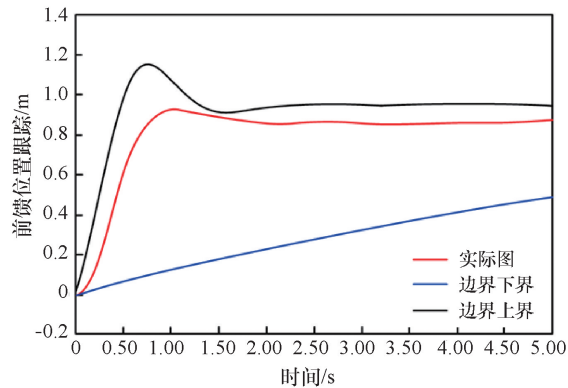


图8 加入前馈后位置跟踪阶跃响应 I

Fig. 8 Adds a feedforward position tracking step response I

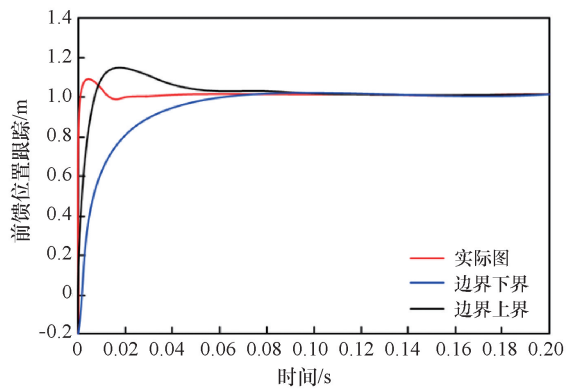


图9 加入前馈后位置跟踪阶跃响应 II

Fig. 9 Adds a feedforward position tracking step response II

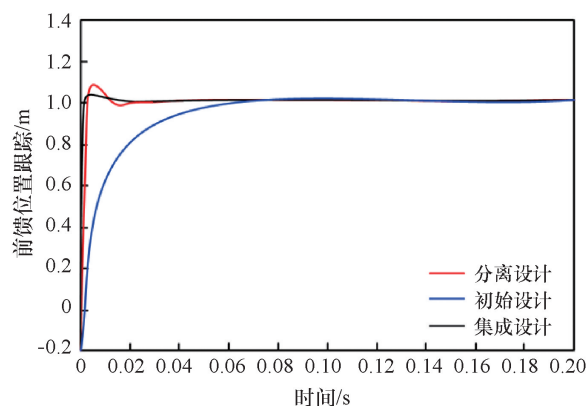


图10 集成与分离设计位置跟踪阶跃响应对比

Fig. 10 Integrated and separated design position tracking step response simulation contrast diagram

## 4 结论

基于工业机器人机械臂结构与控制的耦合性,通过对机械臂伺服系统的结构和控制的详细分析,确定了目标函数和约束指标,建立了机械臂伺服系统集成优化设计方法,解决了分离设计法带来的损失,以及有时甚至不能获得最佳的整体性能问题,实现了工业机器人工作在最佳状态的目标。通过仿真实验验证,基于结构-控制耦合的集成设计方法明显优于传统的分离设计。

为了简化算法,本文只对忽略重力及外加干扰的机械臂动力学方程进行了仿真研究,而对这一约束和其他非刚体效应有待进一步研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Toumi K Y. Modeling, design and control integration: A necessary step in mechatronics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1996, 1(1): 29-37.
- [2] 李素兰, 黄进, 段宝岩. 一种雷达天线伺服系统结构与控制的集成设计研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 140-145.  
Li Sulan, Huang Jin, Duan Baoyan. Integrated design of structure and control for radar antenna servo-mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 140-145.
- [3] Tripathi S M, Tiwari A N, Singh D. Optimum design of proportional-integral controllers in grid-integrated PMSG-based wind energy conversion system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(5): 1006-1031.
- [4] Chen Q, Chen W, Yang G, et al. An integrated two-level self-calibration method for a cable-driven humanoid Arm[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2013, 10(2): 380-391.
- [5] Xiong D, Xiao J, Lu H, et al. The design of an intelligent soccer-playing robot[J]. Industrial Robot, 2016, 43(1): 91-102.
- [6] Iqbal U, Samad A, Nissa Z, et al. Embedded control system for autarep—a novel autonomous articulated robotic educational platform[J]. Tehnicki Vjesnik, 2014, 21(6): 1255-1261.
- [7] Manzoor S, Islam R U, Khalid A, et al. An open-source multi-DOF articulated robotic educational platform for autonomous object manipulation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(3): 351-362.
- [8] Chen C L, Wu T C, Peng C C. Robust trajectories following control of a 2-link robot manipulator via coordinate transformation for manufacturing applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3): 569-580.

- [9] Yang C, Wang X, Cheng L, et al. Neural-learning-based telero-  
bot control with guaranteed performance[J]. IEEE Transactions  
on Cybernetics, 2016, 47(10): 3148-3159.
- [10] Habib T, Komoto H. Comparative analysis of design concepts  
of mechatronics systems with a CAD tool for system architect-  
ing[J]. Mechatronics, 2014, 24(7): 788-804.
- [11] Bai K Q, Luo M Z, Li T, et al. Active vibration adaptive fuzzy  
backstepping control of a 7-DOF dual-arm of humanoid ro-  
bot with input saturation[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy  
Systems, 2016, 31(6): 2949-2957.
- [12] Bai K Q, Luo M Z, Jiang G W, et al. Research of the torque  
compensation method for the vibration suppression of the in-  
dustrial robot[C]. Proceedings of the 2015 IEEE Conference  
on Robotics and Biomimetics, 2015: 2575-2579.
- [13] Zhao J, Zhao T, Xi N, et al. MSU tailbot: Controlling aerial  
maneuver of a miniature-tailed jumping robot[J]. IEEE/ASME  
Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 2903-2914.
- [14] Baisch A T, Ozcan O, Goldberg B, et al. High speed loco-  
tion for a quadrupedal microrobot[J]. International Journal of  
Robotics Research, 2014, 33(8): 1063-1082.
- [15] Xia M, Li T, Zhang Y, et al. Closed-loop design evolution of  
engineering system using condition monitoring through inter-  
net of things and cloud computing[J]. Computer Networks the  
International Journal of Computer & Telecommunications Net-  
working, 2016, 101: 5-18.
- [16] John J Craig. 机器人学导论[M]. 负超, 译. 北京: 机械工业出  
版社, 2006.  
John J Craig. Introduction to robotics mechanics and control  
[M]. Yun chao, trans. Beijing: China Machine Press, 2006.

## An integrated design method coupling structure and control for industrial robot

BAI Keqiang<sup>1</sup>, LIU Zhigui<sup>1</sup>, WANG Yingtong<sup>2</sup>

1. Information Engineering College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. City College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China

**Abstract** Focused on the large error of separation design for industrial robot servo system structure and control, a new integrated design method for coupling structure and control is proposed. The method takes the structural weight, tracking precision and control energy as the target function, takes stable and fast tracking performance as the constraint, and considers the coupling problem of structure and control by using a step iterative strategy so as to achieve the goal of the industrial robot working in the best state. The integrated design method is evaluated via MTALAB on a two joint robot. Simulation results show that the proposed method can make the industrial robot have good robustness, and that the adjustment of the length of time, overshoot elimination and step response are all superior to those by separation design, the robot system being working in optimal performance.

**Keywords** industrial robots; structure and control; coupling; servo system; integrated design ●



(责任编辑 韩星明)