

基于电流的机器人故障检测与安全保护研究*

宋吉来^{1,2,3} 徐方^{1,2,3} 邹风山³

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 沈阳新松机器人自动化股份有限公司 沈阳 110068)

摘要: 提出一种基于电流的机器人故障检测与安全保护方法。当机器人运行中发生齿轮、抱闸等故障或与外界环境发生碰撞时,电机电流会发生突变,因此可以根据这种异常变化判断故障和碰撞的发生。通过直接检测电机电流,利用电机模型与机器人动力学模型,估计外作用力,对故障或碰撞的发生间接测量,实现保护功能。结合动力学控制、关节转矩控制,并采用硅片传输机器人进行碰撞保护实验,实际运行结果验证了该方法的有效性。

关键词: 故障检测; 安全保护; 机器人控制; 动力学控制

中图分类号: TH16; TG659 **文献标识码:** A

Robot Fault Detection and Safety Protection Based on Current

SONG Ji-lai^{1,2,3} XU Fang^{1,2,3} ZOU Feng-shan³

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 110049, China)

Abstract: An approach of robot fault detection and safety protection based on current is presented. When the robot operation, the occurrence of gear holding brake fault or collision with the external environment, the motor current will change suddenly, so this abnormal changes can be used to determine fault and collision occurs. By directly detecting the motor current, followed by use of the motor model and the robot dynamics model to estimate external force, and indirect measuring fault or collision, collision protection can be achieved. Finally, combined with dynamics control and joint control torque, collision protection experiments are carried out on clean-room robot, and actual operating results demonstrate the effectiveness of this method.

Key words: fault detection; safety protection; robot control; dynamic control

0 引言

随着科学技术的发展,机器人、数控机床等设备越来越多的应用在生产、加工、制造等领域。在这些应用中,故障检测与安全保护已然成为这一领域研究的主要问题^[1-2]。当机器人与人或其它设备协同工作时,一次偶然的碰撞会影响整个生产线的效率,甚至对机器人及周围环境设备(特别是人)造成很大的伤害,避免这样的碰撞发生或及时判断出发生碰撞对于机器人、数控设备或人的保护是非常必要的。

根据传感方式的不同,多种策略被应用于机器人和数控设备的故障诊断与安全保护控制^[3]。一种策略是采用六维力/力矩传感器,其安装在机器人腕部,通过假设末端执行器为刚性连接,作用在机器人末端的外力可以被计算出来。然而,这种高灵敏度的力/力矩

传感器价格比较高,常应用于高精度力控制场合,如高精度装配及抛光等领域,限制了其应用范围。第二种策略是采用关节转矩传感器,其安装在机器人关节处^[4]。如果关节转矩为 τ ,那么末端执行器所受外力可以通过 $\tau = J^T F$ 计算得到,其中 J 为机器人的雅可比矩阵。这种方法对机器人的安全控制是很方便的,但传感器的安装增加了关节的柔性,加大了建模与控制的难度,甚至可能引起振动。第三种方法是结合电机模型与控制,采用状态观测器或扰动观测器。Sun和Mills描述了一种采用转矩控制模型的转矩观测器,其基于电机电流和位置信息^[5]。Ohnishi设计了一种扰动观测器,以补偿电机的扰动转矩^[6]。同时,基于扰动观测器和摩擦模型^[7-8],只需电机电流和位置信息可以得到机器人与环境作用的反应转矩,而不需要额外的力/力矩传感器。

收稿日期: 2016-03-08; 修回日期: 2016-03-18

* 基金项目: 国家科技重大专项: 硅片集成传输系统研发和示范应用(2014ZX02103005)

作者简介: 宋吉来(1983—),男,辽宁营口人,中国科学院大学博士,研究方向为机器人运动控制与力控制(E-mail: songjilai@siasun.com)。

当机器人运行中发生齿轮抱闸等故障或与外界环境发生碰撞时,电机电流会异常变化。本文提出一种基于电流的机器人故障诊断与安全保护方法,直接检测电机电流,利用电机模型与机器人动力学模型,估计外作用力,对故障或碰撞的发生间接测量,实现保护功能。将电机模型引入到力/位混合控制,结合动力学控制、关节转矩控制,在硅片传输机器人上进行碰撞保护实验。基于电机电流的机器人故障检测与安全保护,不需要额外的传感器,成本低廉,不降低机器人自身刚性,具有广泛的适用性。

1 机器人构型

图1是典型SCARA结构的硅片传输机器人外形图。这种结构的机器人被广泛应用于洁净、真空环境下的半导体生产工业中。其结构特点包括:

- ① 每个方向的运动由一个电机驱动;
- ② Z轴采用丝杠传动,为升降轴;
- ③ SCARA类型手臂具有两个连杆、三个旋转关节、三组皮带和带轮。

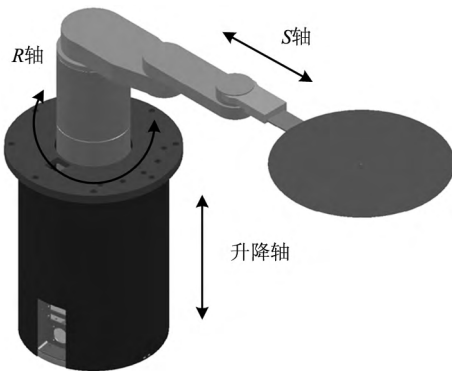


图1 SCARA结构硅片传输机器人

图1中机器人的运动包括三个自由度,升降、旋转和伸缩,运动空间为圆柱形空间。升降和旋转分别由单电机驱动。旋转运动为R轴方向,由单电机驱动。沿半径方向的伸缩运动为S轴方向,由于关节、皮带和带轮的连接关系,S轴的伸缩也由一个电机驱动,关节之间的耦合关系,使得机器人伸缩时末端工具始终保持沿S轴方向的直线运动。

2 运动学与动力学模型

2.1 运动学模型

硅片传输机器人的连杆参数如表1。

表1 硅片传输机器人连杆参数

轴号	连杆扭角 $\alpha_{i-1}/(^\circ)$	连杆长度 $a_{i-1}/(m)$	连杆偏置 $d_i/(m)$	关节角 $\theta_i/(^\circ)$
1	0	0	L_1	0
2	0	0	0	θ_2
3	0	0	d_3	θ_3
4	0	L_4	d_4	θ_4
5	0	L_5	d_5	θ_5

根据DH法^[4]以及连杆参数和角度关系,得到运

动学正解为:

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_2 & -c_2 & 0 & L_3c(\theta_2 + \theta_3) - L_3c(\theta_2 - \theta_3) \\ c_2 & -s_2 & 0 & L_3c(\theta_2 + \theta_3) - L_3c(\theta_2 - \theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & l_1 + d_3 + d_4 + d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

运动学逆解为:

$$\begin{cases} l_1 = p_z - d_3 - d_4 - d_5 \\ \theta_2 = \arctg(-n_x/n_y) \quad || \quad \theta_2 = 180^\circ + \arctg(-n_x/n_y) \\ \theta_3 = \arcsin\left(\frac{-s_2p_x + c_2p_y}{2L_3}\right) \\ \theta_4 = 180^\circ - 2\theta_3 \\ \theta_5 = -90^\circ + \theta_3 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 动力学模型

SCARA构型硅片传输机器人的动力学计算采用牛顿-欧拉法^[4],其包括计算速度和加速度的向外迭代以及计算力和力矩的向内迭代两部分。牛顿-欧拉方程的递推形式为:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\omega_{i+1} &= {}^{i+1}R^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \\ {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1}R^i\dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i\omega_i \times \dot{\theta}_{i+1}{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1}{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \\ {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^{i+1}R^i(\dot{\omega}_i \times {}^i p_{i+1} + \omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i p_{i+1})) + \dot{v}_i \\ {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} &= {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}p_{C_{i+1}} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}p_{C_{i+1}}) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \\ {}^{i+1}F_{i+1} &= m_{i+1}{}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \\ {}^{i+1}N_{i+1} &= {}^{C_{i+1}}I_{i+1}{}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1}{}^{i+1}\omega_{i+1} \\ {}^i f_i &= {}^{i+1}R^{i+1}f_{i+1} + {}^i F_i \\ {}^i n_i &= {}^i N_i + {}^{i+1}R^{i+1}n_{i+1} + {}^i p_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i p_{i+1} \times {}^{i+1}R^{i+1}f_{i+1} \\ \tau_i &= {}^i n_i^{T_i} \hat{Z}_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中, ${}^i\omega_i$ 表示第*i*个连杆的角速度在坐标系{*i*}中的表示。 $\dot{\theta}_i$ 表示第*i*个关节的旋转引起的角速度,对于串联机器人, ${}^i\omega_i$ 是 $\dot{\theta}_i$ 和上一个关节速速 ${}^i\omega_{i-1}$ 的合成。 ${}^{i+1}R$ 是3×3维的姿态阵,是坐标系{*i*}相对坐标系{*i+1*}的姿态矩阵。 ${}^{i+1}\dot{v}_{i+1}$ 是坐标系{*i+1*}的原点加速度在坐标系{*i+1*}的表示, ${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}}$ 是第*i+1*个连杆质心的加速度在坐标系{*i+1*}的表示。 ${}^{i+1}F_{i+1}$ 是第*i+1*个连杆质心处由加速度引起的力在坐标系{*i+1*}的表示。 m_{i+1} 表示第*i+1*个连杆的质量, ${}^{C_{i+1}}I_{i+1}$ 是第*i+1*个连杆相对于第*i+1*质心坐标系的惯量矩阵。 ${}^i f_i$ 是第*i*个质心处受力,是加速度产生的力和后一个连杆传递力的合成。 ${}^i n_i$ 表示坐标系{*i*}原点处的扭矩,是3×1维的扭矩, τ_i 是 ${}^i n_i$ 在Z轴方向的分量,也是关节*i*处所需的扭矩值。

SCARA构型手臂满足角度耦合关系:

$$\begin{cases} \theta_4 = 180^\circ - 2\theta_3 \\ \theta_5 = -90^\circ + \theta_3 \end{cases} \quad (4)$$

以及连杆长度关系:

$$L_3 = L_4 \quad (5)$$

应用连杆参数和角度的耦合关系简化动力学解,

可以得到机器人三个驱动轴动力学解为:

$$\tau_1 = m \ddot{h} + mg \tag{6}$$

$$\tau_2 = (m_2 l_{m1}^2 + m_3 l_{m1}^2 + m_4 L^2 + m_4 L_{m4}^2 - 2m_4 L l_{m4}) c(2\theta_3) + m_5 l_{m5}^2 + 2m_5 L^2 + 4m_5 L l_{m5} s\theta_3 - 2m_5 L^2 c2\theta_3 \ddot{\theta}_2 + (m_3 l_{m3}^2 + m_4 L^2 - m_4 l_{m4}^2) \ddot{\theta}_3 + (4m_4 L l_{m4} s(2\theta_3) + 4m_5 L l_{m5} c\theta_3 + 4m_5 L^2 s2\theta_3) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + I_{2z} \ddot{\theta}_2 + I_{3z} (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) + I_{4z} (\ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_3) + I_{5z} \ddot{\theta}_2 \tag{7}$$

$$\tau_3 = m_4 (L^2 \ddot{\theta}_3 + l_{m4}^2 \ddot{\theta}_3 + 2L l_{m4} c(2\theta_3) \ddot{\theta}_3) + 2L l_{m4} s(2\theta_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) + m_3 l_{m3}^2 \ddot{\theta}_3 + 2m_3 (L^2 \dot{\theta}_3 - l_{m5} c\theta_3 \dot{\theta}_2^2 + L^2 l_{m5} c\theta_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + L^2 c2\theta_3 \dot{\theta}_3 - L^2 s2\theta_3 (\dot{\theta}_2^2 - \dot{\theta}_3^2)) + I_{3z} \ddot{\theta}_3 + I_{4z} \ddot{\theta}_3 \tag{8}$$

其中, m 是各连杆质量的总和。 m_i 为第 i 个连杆的质量 L 为第 3 4 连杆的长度 L_{mi} 为第 i 个连杆的质心位置。

3 机器人的力/力矩检测

3.1 电机转矩模型

在研究永磁同步电机数学模型时,常作如下假设^[9]:

- (1) 忽略空间谐波,设三相绕组对称,气隙磁通按正弦分布;
- (2) 忽略磁路饱和,各绕组自感和互感恒定;
- (3) 忽略铁心、磁滞等损耗;
- (4) 不考虑频率、温度变化对绕组电阻影响。

永磁同步电机动态方程由磁链方程、电压方程和转矩方程组成。为分析及控制简单,通常采用忽略铁损时的 d 、 q 轴数学模型。保持 d 轴电流为 0 的 $i_d = 0$ 控制时,永磁同步电机的数学模型简化为如下方程:

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{dL_s}{dt} & -L_s \omega_e \\ L_s \omega_e & R_s + \frac{dL_s}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \tag{10}$$

转矩方程:

$$\tau_m = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_{sq} \tag{11}$$

这时的电流矢量随负载状态的变化,在 q 轴上移动。

3.2 基于模型的力/力矩检测

当机器人采用减速器传动时,关节角度和转矩满足:

$$q = N^{-1} q_m \tag{12}$$

$$\tau = N \tau_m \tag{13}$$

式中 $N \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是每个关节减速比的对角阵 q 和 q_m 分别为关节角度和电机角度, τ 和 τ_m 分别为关节转矩和电机转矩。

重写完整动力学方程为以下形式:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F(q, \dot{q}) + g(q) = \tau - \tau_{ext} \tag{14}$$

式中, $F(q, \dot{q})$ 为机器人关节处的摩擦力矩, τ_{ext} 为施加在关节上的外作用力矩。

考虑电机转子动力学,可以得到转子的转矩平衡方程为:

$$J_m \ddot{q}_m + F_m(q_m, \dot{q}_m) + N^{-1} (M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F(q, \dot{q}) + g(q) + \tau_{ext}) = \tau_m \tag{15}$$

式中, J_m 为电机转子的惯量, $F_m(q_m, \dot{q}_m)$ 为电机转子处的摩擦力矩。带入关节角度关系,得到:

$$(M(q) + N^2 J_m) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F(q, \dot{q}) + g(q) + \tau_{ext} = \tau \tag{16}$$

推导过程中,将电机转子处的摩擦归入摩擦项 $F(q, \dot{q})$ 。式(16)为计及电机转子动力学在内的机器人完整动力学模型。

由此可得作用在关节上的外部转矩 τ_{ext} :

$$\tau_{ext} = \tau - [(M(q) + N^2 J_m) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F(q, \dot{q}) + g(q)] \tag{17}$$

代入电机转矩模型和关节转矩关系,得到:

$$\tau_{ext} = \frac{3}{2} N n_p \psi_f i_{sq} - [(M(q) + N^2 J_m) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F(q, \dot{q}) + g(q)] \tag{18}$$

代入雅可比矩阵的力传递关系,得到基于模型的机器人末端 6×1 维广义外力 F_{ext} 为:

$$F_{ext} = J^{-1} \{ \frac{3}{2} N n_p \psi_f i_{sq} - [(M(q) + N^2 J_m) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + F(q, \dot{q}) + g(q)] \} \tag{19}$$

机器人在运行中与外界环境发生碰撞或者出现齿轮、抱闸等故障时,电机电流会异常变化,基于模型的力/力矩检测值 τ_{ext} 、 F_{ext} 也会突变,当 τ_{ext} 、 F_{ext} 大于限定值时则判定故障的发生。此时可以通过动力下电等方式,实现安全保护功能。

4 实验

采用基于模型的力/力矩检测方法,在硅片传输机器人上进行碰撞实验。图 2 为机器人在碰撞过程中的电机转矩曲线,可以看出,碰撞发生时电机转矩迅速增加,最大变化量约 $0.4 \text{ N} \cdot \text{m}$,可以在电机转矩达到最大值前检测到碰撞并实施有效保护。图 3 为采用模型的力/力矩检测进行碰撞判断,并在碰撞发生时动力下电实施安全保护的电机转矩曲线。可以看出,电机转矩在 10 ms 左右增加约 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,便可进行有效的碰撞检测并进行保护,转换到机器人末端的力保护精度约为 0.1 N 。传统的采用六维力传感器的方式,传感器检测的精度一般为满量程的百分之一,以传感器量程 10 N 为例,末端的力保护精度约为 0.1 N 。对比可见,基于模型的力/力矩检测方法在检测和保护精度上

与采用六维力传感器的方式相当,检测时间在10ms左右也满足系统需求,但其成本低廉,只采用机器人本身的电流和位置传感器,且不会因传感器的安装降低机器人自身的刚性,具有一定的优越性。

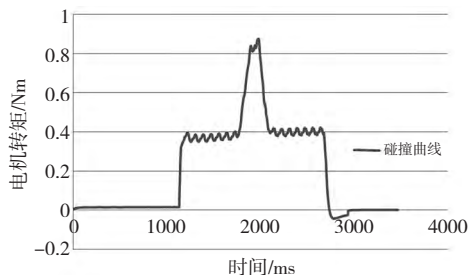


图2 碰撞过程电机转矩曲线图

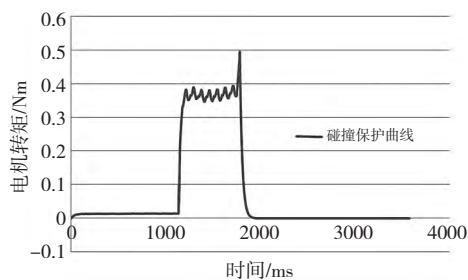


图3 碰撞保护电机转矩曲线图

5 结论

本文提出一种基于电机电流的机器人故障检测与安全保护方法,该方法不需要使用额外的传感器,仅根据电机电流以及系统模型来进行碰撞检测。将电机转矩模型和机器人动力学模型结合得到外力检测的力/力矩模型。最后采用硅片传输机器人进行碰撞保护实验,实验结果表明该方法与传统的采用六维力传感器的方式检测精度相当,可以在10ms量级的时间内判断

出系统的异常外作用力,能够及时检测系统故障并保障机器人与设备的安全。

[参考文献]

- [1] Mazzocchi T, Diodato A, Ciuti G, et al. Smart sensorized polymeric skin for safe robot collision and environmental interaction [C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2015: 837 - 843.
- [2] 李梦群, 马维金, 王爱玲, 等. 现代数控机床故障诊断及维修 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [3] 刘志刚, 赵晓燕. 浅谈数控机床机械故障诊断的方法 [J]. 装备制造技术, 2007(4): 67 - 68.
- [4] Phong L D, Choi J, Kang S. External force estimation using joint torque sensors for a robot manipulator. Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 4507 - 4512.
- [5] Sun D, Mills J K. Development of partial model-based torque control of AC induction motors. IEEE Transactions on Robot and Automation, 2001, 17(1): 100 - 107.
- [6] Ohnishi K, Shibata M, Murakami T. Motion control for advanced mechatronics. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1996, 1(1): 56 - 67.
- [7] Murakami T, Yu F, Ohnishi K. Torque sensorless control in multi degree-of-freedom manipulator. IEEE Transactions on Induced Electronics, 1993, 40(2): 259 - 265.
- [8] O'Sullivan T M, Bingham C M, Schofield N. Observer-based tuning of two-inertia servo-drive systems with integrated SAW torque transducers. IEEE Transactions on Induced Electronics, 2007, 54(2): 108 - 109.
- [9] Zhang Y, Zhu J. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor with reduced torque ripple and commutation frequency. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 26(1): 235 - 248.

(编辑 李秀敏)

(上接第55页)

- [6] Young-min Kim, Sung-yoon Jung, Inhyuk Moon. Design of a wearable upper-limb rehabilitation robot using parallel mechanism [C]. ICCAS-SICE 2009. IEEE, 2009: 785 - 789.
- [7] 杨钢, 李宝仁, 傅晓云. 气动人工肌肉并联机器人平台 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 39 - 45.
- [8] 范伟, 彭光正, 高建英, 等. 气动人工肌肉驱动三自由度球面并联机器人关节的位置控制研究 [J]. 液压气动与密封, 2003(6): 1 - 5.
- [9] C P Chou, B Hannaford. Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles [C]. Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Robotic and Automation. San Diego, USA, 1994, 1: 281 - 286.
- [10] Le Duy Khoa, Dinh Quang Truong, Kyoung Kwan Ahn.

Synchronization controller for a 3-R planar parallel pneumatic artificial muscle(PAM) robot using modified ANFIS algorithm [J]. Mechatronics, 2013, 23: 462 - 479.

- [11] RASIM S, ALIZADE I. Forward and reverse displacement analysis of a 6-DOF in-parallel manipulators [J]. International Journal of Tools & Manufacture, 1997, 39(2): 321 - 342.
- [12] 余跃庆, 徐齐平. 柔顺机构 PR 伪刚体动力学建模与特性分析 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 225 - 229.
- [13] 韩方元, 赵丁选, 李天宇. 3-RPS 并联机构正解快速数值算法 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 229 - 233.
- [14] 王南, 赵乘康, 高鹏, 等. 并联机构 3-SPS/S 的静、动态刚度性能研究 [J]. 机械设计与制造, 2013(8): 213 - 215.

(编辑 李秀敏)