

# 基于 ACR9000 控制器的自动光学检测平台设计

段建民, 田 奇

(北京工业大学 智能控制研究所, 北京 100124)

**摘要:** 针对自动光学检测 (AOI) 平台运行过程中的定位精度控制问题, 提出了一种基于速度和加速度前馈控制与 PID 反馈控制的复合控制算法, 该算法对输入量进行跟踪补偿控制以消除系统稳态误差, 用于提高 AOI 平台定位精度; 基于开放式的数控系统设计了 AOI 平台; 在 Matlab/Simulink 环境下, 构建了基于该复合控制算法的定位精度控制仿真模型, 仿真结果验证了复合控制算法的有效性; 将该复合控制算法作为 ACR9000 控制器的控制算法, 并基于 ACR9000 控制器进行 AOI 平台实验研究; 应用该 AOI 平台进行了印刷电路板 (PCB) 检测实验, 实验结果表明文中复合控制算法能够提高 AOI 平台定位精度, AOI 平台的定位精度满足印刷电路板检测要求, 可以将该 AOI 平台用于印刷电路板检测。

**关键词:** 自动光学检测; 精密平台; 运动控制器; 定位精度

## Automatic Optical Detection Platform Design Based on ACR9000 Controller

Duan Jianmin, Tian Qi

(Institute of Intelligent Measurement and Control, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In view of the automatic optical inspection (AOI) platform positioning precision control problem in the process of operation, putting forward a compound control algorithm based on the velocity and acceleration feedforward control algorithm and the PID feedback control algorithm. For improving the positioning precision of AOI platform, the compound algorithm eliminates the steady-state error of the system by tracking compensation control to the input. The AOI platform was designed based on the open CNC system. In the Matlab / Simulink environment, the position precision control simulation model was built based on the compound control algorithm, and the results verified the effectiveness of the compound control algorithm. Then applying this compound control algorithm to the ACR9000 controller, and conducting the experiment of the AOI platform based on the controller. The printed circuit board (PCB) test experiment was carried out based on the AOI platform, the results showed that the precision of AOI platform positioning was improved by the compound control algorithm and it met the detection requirements of printed circuit board, so the AOI platform can be used to detect the print circuit board.

**Keywords:** automatic optical inspection; precision platform; motion controller; positioning precision

## 0 引言

AOI (自动光学检测) 技术是当前电子组装生产过程质量检测的重要手段之一, AOI 技术的应用已经扩展到了多个领域。随着 PCB (印刷电路板) 微组装技术的发展, PCB 板的布线密度甚至已经达到了微米级, 因此对检测的精度提出了很高的要求<sup>[1]</sup>。高精度、快速性对检测系统中的机械及控制部分提出了更高的要求, 因此高性能的工作台设计十分必要。

针对于高速度、高精度、大行程的要求, 本文提出了一种基于 ACR9000 多轴运动控制器的控制系统及 XYZ 三轴直角坐标式高精度三自由度并联运动平台, 经过对平台系统的分析, 其能够满足 AOI 系统对于工作台的性能要求。

传统的 AOI 设备工作方式是将待检测的 PCB 板放置在工作台上, 而 CCD 摄像机则固定不动, 这样的缺点在于工作台高速移动过程中的惯性大, 对于检测的精度会有很大影响。若将待检测的 PCB 板固定在工坐台上避免惯性作用的话就会产生多余的操作, 影响工作效率。相比较传统的工作台, 该平台的工作方式是将待检测 PCB 板放置在静止的平台上, 而将

CCD 摄像头固定在运动平台的 Z 轴上, 这样就不会受到平台高速移动带来的惯性的影响。

## 1 AOI 平台系统设计

按照模块化的设计思路及开放式的数控系统设计方案, 对整个系统的性能指标进行分析, 文中的 AOI 系统主要由 AOI 工作平台、CCD 摄像机以及上位机软件等构成。AOI 工作平台设计性能指标为定位精度  $\pm 10 \mu\text{m}$ , 最大运动速度为  $500 \text{ mm/s}$ , 最大加速度为  $500 \text{ mm/s}^2$ , 工作空间为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

AOI 工作平台是由三自由度平台、运动控制器以及监控软件 3 个主要的模块组成。三自由度平台采用精密机械部件组成以保证运动精度。运动控制器则采用上位机和下位机分层控制结构, 上位机采用计算机, 下位机采用 ACR9000 运动控制器, 同时应用先进的控制策略进行控制精度的优化。监控软件的编程是在 VC6.0 语言环境下, 基于 ACR9000 控制器提供的动态链接库 (DLL) 文件实现。

### 1.1 AOI 平台硬件搭建

精密运动平台的结构有传统的十字交叉重叠式、X/Y 驱动轴分离的固定龙门式等, 为了减小平台的运动惯量, 工作平台采

收稿日期: 2014-11-06; 修回日期: 2015-01-07。

**作者简介:** 段建民 (1959-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为车辆环境信息融合、道路识别、自动驾驶技术、嵌入式汽车电子控制技术、网络化监控技术和智能化仪器仪表方向的研究。

用 H 型双边驱动的三轴直角坐标式并联运动结构, 平台采用解耦设计, 各轴之间无耦合作用<sup>[2]</sup>, 如图 1 所示。X 轴采

用 H 型双边驱动结构, 这种结构的优点在于能够使装载滑台更平稳, 更快的进行 X 轴定位, 同时能够保证定位精度。X 轴采用控制器并联同步控制驱动器进行驱动, 由 ACR9000 控制器的位置输出信号同时分配到 X 轴的驱动器, 这样可以保证两个电机之间的同步性及控制精度。

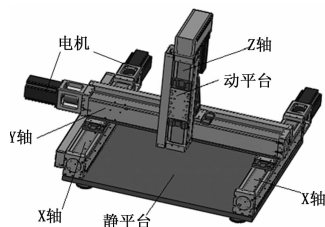


图 1 三自由度工作台模型

## 1.2 伺服电机选型

为与交流伺服电机相匹配, 平台运动轴选用滚珠丝杠作为传动机构, 滚珠丝杠是由丝杠、螺母、滚珠等零件组成的机械结构, 它具有传动效率高, 定位精度高等优点。

交流伺服电机的选择由平台的性能指标决定, 以 X 轴电机的选择为例, 电机通过联轴器与丝杠连接, 减速比为  $R=1$ , 丝杠导程  $P=5\text{ mm}$ , 丝杠直径  $D=16\text{ mm}$ , 丝杠长度  $L=500\text{ mm}$ , 丝杠密度  $\rho=7.85\text{ kg/m}^3$ , 轴负载质量  $m=20\text{ kg}$ 。

由以上数据计算丝杠转动惯量  $J_1$  和平台转动惯量  $J_2$  分别为:

$$J_1 = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} \times 10^{-12} = 0.25 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (1)$$

$$J_2 = \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 \cdot m \times 10^{-6} = 0.13 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2)$$

求 (1) + (2) 得到负载转动惯量  $J$  为:

$$J = J_1 + J_2 = 0.38 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

负载转矩  $T$  计算 (摩擦系数  $\mu=0.1$ , 机械效率  $\eta=0.9$ ),

$$\text{负载转矩 } T \text{ 为: } T = \frac{\mu m g \cdot P}{2\pi \eta} = 0.017 \text{ N} \cdot \text{m}$$

鉴于 X 轴采用 H 型双轴驱动, 根据上述的计算数据, 选取的电机型号为安川 SGMJV-04ADAH121, 该电机额定输出功率 400 W, 转动惯量  $0.442 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 额定转矩 1.27 N·m, 满足工作台运动控制的要求。

## 2 AOI 工作平台运动控制系统设计

为了满足 AOI 平台高精度、高速度的性能要求, 应提高 AOI 平台伺服控制的响应速度、跟随精度以及定位精度, 选取高性能的伺服电机以及有效的控制方法是伺服控制系统设计的主要内容。

### 2.1 伺服系统控制原理分析

数控机构工作过程中, 对系统的一个重要的要求就是其对指令的跟踪能力, 在理想情况下, 输出能够无延迟、无超调的跟踪输入指令的变化。同时必须要在满足主要要求的同时兼顾跟踪能力和抗干扰能力, 而且系统的动态响应应尽可能的提高, 以便满足高速度的要求。

PID 控制是应用最为广泛、技术最为成熟的一种控制策略, 算法简单可靠, 而且具有很好的鲁棒性能<sup>[3]</sup>。但是 PID 控制在快速响应时的跟踪补偿性能不足。前馈控制是按扰动量进行补偿的开环控制, 按照扰动量的大小直接进行校正, 在

PID 控制的基础上加入前馈补偿控制, 以构成对输入进行跟踪补偿的控制系统。根据传统控制理论以及前馈控制的优点, 设计了反馈 PID+前馈控制的算法, 并在系统实验平台下进行编程调试, 通过位置系统的典型信号响应的仿真与实验, 分析该算法对平台控制系统的性能影响。

### 2.2 前馈控制原理

平台的电机伺服控制系统采用电流环、速度环和位置环的三闭环控制方式, 如图 2 所示, 实际控制中通常将速度环和电流环设计成比例积分控制, 位置环设计成比例控制。由于交流伺服电机的数学模型较为复杂, 需要对其模型进行结构简化<sup>[4]</sup>。电流环对电机的控制影响较小可以忽略掉, 位置环可以等效为一个比例控制时的控制系数  $K_c$ 。

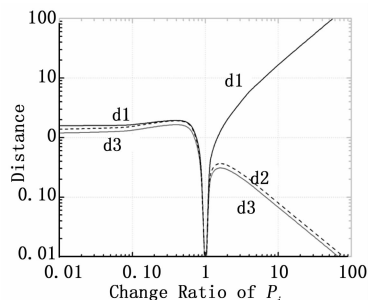


图 2 伺服系统控制结构图

速度环可以等效为一个惯性环节, 可以表示为

$$G_v(s) = \frac{K_v}{T_v s + 1}$$

电机可以简化为一个惯性环节为:

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}$$

则伺服系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}$$

其中:  $T_1 = T_m T_v$ ,  $T_2 = T_v + T_m$ ,  $K = K_c K_v K_m$ 。

由图 3 可以得到系统误差  $E(s)$  对系统输入的传递函数为:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{C(s) - R(s)}{R(s)} = \frac{1 - G(s)W(s)}{1 + H(s)G(s)}$$

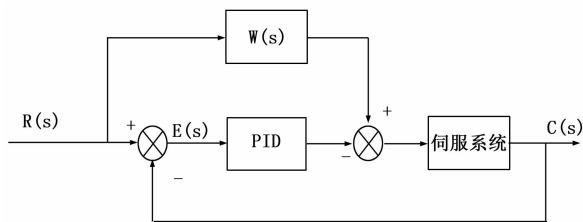


图 3 前馈+反馈控制结构图

根据控制原理, 系统误差传递函数的分子等于 0, 则可以使系统的理论误差为 0, 令上式系统误差传递函数分子为零可以得到

$$W(s) = \frac{1}{G(s)} = \frac{T_1 s^2 + T_2 s + 1}{K}$$

得到的前馈控制器的控制函数, 因为是对位置的前馈控制, 所以上式可分为加速度前馈与速度前馈两个部分, 即上式可以变为:

$$W(s) = \frac{T_1 s^2}{K} + \frac{T_2 s}{K} + \frac{1}{K}$$

(3)

式 (3) 中第一项为加速度前馈项, 第二项为速度前馈项, 第三项为常数项, 综合上述分析, 在系统中加入加速度与速度前馈控制, 可以使系统误差为零。但在实际中, 系统误差是不可能为零的, 但是前馈控制可使误差缩小到可允许的范围之内。另外, 前馈控制不改变系统的稳定性。

未加入前馈控制器系统传递函数可以表示为

$$G_c(s) = \frac{H(s)G(s)}{1 + H(s)G(s)}$$

(4)

加入前馈控制后的传递函数可表示为

$$G_{ef}(s) = \frac{H(s)G(s) + W(s)G(s)}{1 + H(s)G(s)}$$

(5)

通过比较 (4) 与 (5) 两个传递函数, 系统增加前馈与未增加前馈的传递函数的分母是相同的, 即两个传递函数的极点是相同的, 所以增加前馈控制不会影响系统的稳定性, 而控制系统加入前馈控制, 能够以超前的控制作用补偿系统的动态滞后, 从而提高系统的控制精度, 同时不会影响原系统稳定性。所以在闭环反馈加前馈控制可以保证系统的动态性能。图 4~5 为在正弦信号激励下, 系统未加入前馈控制器与加入前馈控制器的 MATLAB 仿真结果。

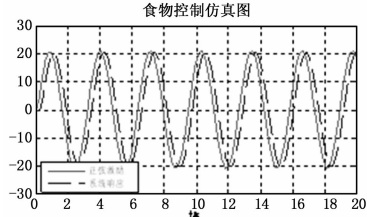


图4 未加入前馈控制器结果

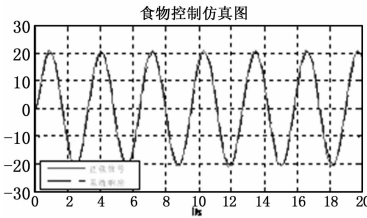


图5 加入前馈控制器结果

图 4 为未加入前馈控制器的结果, 系统响应与激励信号之间会因为跟踪误差而产生曲线的相位差。图 5 则系统响应与激励信号之间的相位差极小, 由图 4~5 的对比结果可知前馈控制器能够减小系统响应的稳态跟踪误差, 从而达到了指令的快速跟踪和提高系统精度的要求。

3 ACR9000 控制器参数整定

基于以上的分析, 可知前馈控制器可以减小系统响应的跟踪误差, 文中选用 ACR9000 控制器作为下层控制。ACR9000 运动控制器是一个全数字的运动控制伺服系统, 其在传统 PID 算法的基础上添加了速度前馈控制和加速度前馈控制算法。ACR9000 控制器的运行软件 ACRView 提供了 TUNNING 模块和示波器模块, 可以用于系统的 PID 参数整定以及速度、加速度前馈增益的参数整定及仿真。速度前馈用来减小微分增益带来的跟随误差, 加速度前馈用来补偿由于惯性带来的跟随误差, 同时采用陷波滤波器来抵消共振<sup>[5]</sup>。图 6 为 ACR9000 控制器的伺服环路控制结构图。

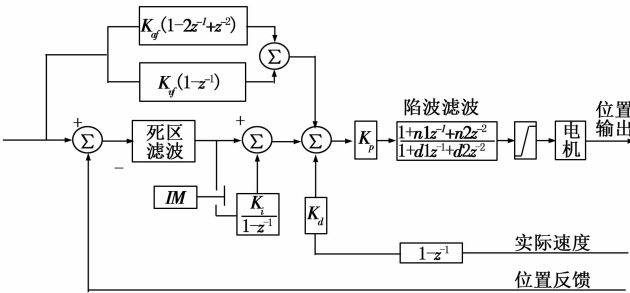


图 6 ACR9000 伺服环路控制结构图

图 6 中  $K_p$  为比例增益,  $K_i$  为积分增益,  $K_d$  为微分增益,  $K_{vf}$  为速度前馈,  $K_{af}$  为加速度前馈增益。式中  $U(s)$  作为输出信号,  $V_c(s)$  作为指令速度信号,  $A_c(s)$  作为指令加速度信号,  $e(s)$  作为偏差信号,  $V_a(s)$  作为实际速度信号。

通过伺服环路的控制结构图得到实际的控制公式为

$$U(s) =$$

$$K_p \times [K_{vf} \times V_c(s) + K_{af} \times A_c(s) + K_i \times e(s) - K_d \times V_a(s)]$$

3.1 性能整定

通过整定众多的参数来调节电机的工作状态, 根据之前 Simulink 仿真得到的整定参数再结合常用的整定方法对控制器进行整定。具体分为 3 个步骤: 1) 进行比例增益的调节, 逐渐增大比例增益, 通过反复调节并观察阶跃响应的曲线以获得一个无较大超调的快速响应时间。2) 得到比较满意的快速响应曲线之后, 逐渐增大积分增益, 以消除系统静差, 使系统响应达到期望值, 此时的曲线超调量还是很大。3) 逐渐增大微分增益, 降低系统响应的超调量, 使系统获得期望的阶跃响应<sup>[6]</sup>。通过反复调节 PID 参数之后能够得到满足期望的响应曲线。如图 7 所示为系统未加整定的阶跃响应曲线, 图 8 为经过整定后的阶跃响应曲线。

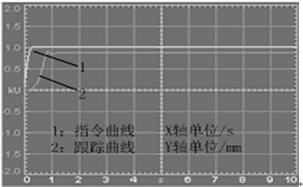


图7 阶跃信号整定前波形图

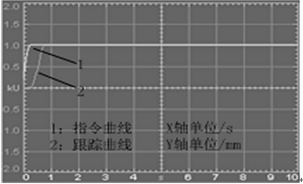


图8 阶跃信号整定后波形图

通过系统阶跃响应调整好的 PID 参数, 并且参数保持不变, 加入正弦激励信号以调整速度增益以及加速度增益。图 9 示为系统未进行前馈整定的波形图, 系统加入正弦信号后, 系统响应与激励信号不是完全重合的, 系统响应曲线相对于激励信号曲线存在一定的滞后和跟踪误差, 当适时的调整速度、加速度增益之后, 观测到的系统响应曲线与正弦激励信号曲线较为吻合, 如图 10 所示。

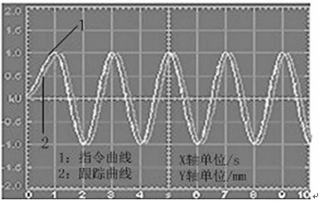


图9 未进行前馈整定结果

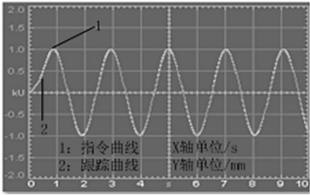


图10 进行前馈整定结果

3.2 定位精度测量

通过对平台进行精度检测，直线运动的定位精度：X 轴在整个 300 mm 的丝杠行程上的定位精度 $\leq 0.01$  mm，重复定位精度 $\leq 0.015$  mm；Y 轴在整个 300 mm 的丝杠行程上的定位精度 $\leq 0.01$  mm，重复定位精度 $\leq 0.014$  mm，Z 轴在 100 mm 的丝杠行程上的定位精度 $\leq 0.01$  mm，重复定位精度 $\leq 0.02$  mm。经过精度测试，验证了该平台的精度满足设计要求。

3.3 实验验证

经过工作平台系统建立及运动控制仿真后，进行平台实际运动控制及定位实验，验证 AOI 平台的控制精度指标。

应用 AOI 平台上的 CCD 相机对印刷电路板进行图像采集同时上传到上位机，通过快速 Hough 变换检测圆的算法，处理 CCD 相机采集的图像得到其定位圆圆心坐标及半径数据，并将其圆心坐标进行坐标转换后将数据直接传输到控制器，控制器将转换后的数据转换为 AOI 平台的运动量，并进行运动控制，此时控制器会计算出一个跟踪误差，可以通过 ACR-View 软件提供的示波器进行采集，经过 50 次的实验测试，得

到控制精度均值如表 1 所示。而且当平台移动到检测板定位圆上方后，CCD 相机再次采集电路板定位圆图像进行处理，得到的数据与软件示波器的误差值进行比较其数值吻合，从而验证了控制的精度值，得到 AOI 平台各轴的控制精度 $\leq 0.01$  mm，满足设计 AOI 平台时的定位指标。

表 1 实验控制精度表

精度指标	X 轴精度	Y 轴精度	Z 轴精度
10 m	5.06 m	4.12 m	8.72 m

4 总结

本文研究的龙门式三自由度并联运动平台及运动控制系统已经成功进行了调试，由实验分析结果知，该平台的软硬件结构实现合理，定位速度快，精度高且运行平稳。平台已成功运用到了 PCB 板自动光学检测中，经过一段时间的运行证明了该平台的快速性、高精度以及平稳性等特点。由于该平台采用开放式模块化的设计思路，所以该平台的通用性也大大提高了，除了进行 PCB 板的光学检测外，同时还可以应用到其他方面，例如焊点焊接工作台等高速、高精度要求的数控机构。

参考文献：

[1] 邵守东, 姚立新. 自动光学检测仪工作平台运动控制系统的研究 [J]. 电子工业专用设备, 2009, 3-7

[2] 吴 奎. 龙门式精密运动平台的滑模控制算法研究与实现 [D]. 广州: 广东工业大学, 2012.

[3] 王 蕾, 宋文忠. PID 控制 [J]. 自动化仪表, 2004 (4): 3-8

[4] 金 钊, 林宝君, 冀群心. 数控系统中伺服系统位置前馈控制器的设计 [J]. 测控技术, 2010 (8): 65-57

[5] PARKER 公司. ACR Programmer's Guide [Z]. 88-89

[6] 郝 齐, 关立文, 王立平. 基于遗传算法并联机床电机伺服系统控制参数整定 [J]. 清华大学学报, 2010 (11): 1081-1086

（上接第 2254 页）

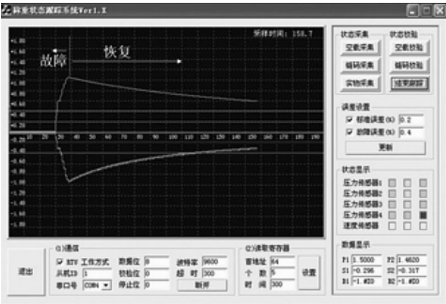


图 10 称重状态在线监测与故障诊断结果

6 结束语

本系统应用 TI 公司 MSC1210 单片机最小系统和信号分离器，实现了并联称重传感器系统的多个称重传感器并联输出的独立采集。该系统一方面与现有的称重显示控制器相结合满足多个称重传感器的累计量计算；另一方面利用皮带秤称重传感器累计量校准方法实现了并联传感器系统压力传感器的在线状态监测与故障诊断，大大提高了皮带秤调试效率和精度，为并联传感器系统压力传感器的故障诊断和集中监

控提供一种有效手段。

参考文献：

[1] 厉 达, 何福胜. 皮带秤技术的应用现状及发展趋势 [J]. 衡器, 2008, 37 (5): 1-8.

[2] 马华旭, 潘宏侠. 提高电子皮带秤应用准确度的技术措施 [J]. 矿山机械, 2009, 37 (7): 77-80.

[3] 谢光辉. 电子皮带秤计量误差的动态分析 [J]. 计量与测试技术, 2010, 37 (4): 31-32.

[4] 胡夕岚. 提高电子皮带秤使用精度的方法 [J]. 华中电力, 2007, 20 (2): 51-54.

[5] 席建中, 韩成春, 乔淑云. 自整定式皮带秤称重装置 [J]. 仪表技术与传感器, 2012 (10): 94-95.

[6] 李 刚, 林 凌, 何 峰. 高性能 SoC 模拟信号处理单片机 MSC1210 原理与开发应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.

[7] 苏晓龙, 王香婷. 基于 RS-485 总线的数据采集系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2007, (12): 52-53, 78.

[8] 孙荣军, 韩成春, 席建中. 皮带秤称重传感器累计量校准方法 [P]. 中国: ZL201110242156.7. 2014.