

doi: 10.7690/bgzd.2014.11.019

## 共轴双驱型开闭比调节装置控制系统

芮伟, 杨孝松, 黄少棠, 龙秀虹

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对风洞试验段搓板机构存在的“动板”错动困难、定位精度不高、重复性较差和不利于人员现场检查动板错动情况等问题, 研制一种通用运动自动控制器+交流伺服系统的控制系统。按照技术指标和要求, 控制系统将驱动电机更新为交流伺服电机, 位置控制采用 UMAC 的速度/加速度前馈 PID 控制算法、同步控制采用交叉耦合同步策略。结果表明: 该系统稳定可靠, 正反向定位精度优于 0.5 mm, 同组中 2 台电机的同步效果良好, 达到设计指标要求, 并已成功应用于风洞试验段的流场调试。

**关键词:** 共轴双驱型; 开闭比; 调节装置; 控制系统

**中图分类号:** TJ86 **文献标志码:** A

### Control System of Coaxial Double Drive Porosity Adjusting Mechanism

Rui Wei, Yang Xiaosong, Huang Shaotang, Long Xiuhong

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** To eliminate wind tunnel porosity adjusting mechanism-moving plate's "movable plate" running difficulty, low position accuracy, low repeatability and unfavorable inspector's inspection problems, the control system was developed based on the combination of universal motion and automation controller (UMAC) and AC servo motors. According to specifications and requirements, the control system upgraded drive motors to AC servo motors, which position control applied the control algorithm of PID + velocity/acceleration feed forward + notch filter, synchronization control used the cross-coupling synchronization control strategy. The application showed that the system is stable and reliable, positive and negative positioning accuracy is better than 0.5 mm, synchronization of 2 motors in same group is good, design specifications has been satisfied and successfully applied to flow field debugging of wind tunnel test section.

**Keywords:** coaxial double drive; open-close proportion; adjusting mechanism; control system

## 0 引言

试验段开闭比是影响跨声速风洞的重要几何参数, 选择合适的开闭比以及分布位置, 是改善风洞流场品质的重要保证<sup>[1]</sup>。而作为某跨声速风洞开孔壁试验段开闭比的调节装置-搓板机构, 其原理是采用两层通气孔板(动板和定板)错动的方法来改变出气孔的流通面积, 达到调节试验段孔壁开孔率的作用, 通过计算最终形成试验段孔壁的开闭比数据。结构上采用一套传动机构带动一组“动板”前后移动的方式, 通过控制“动板”相对“定板”的位置, 连续改变出气孔的通气面积, 从而达到改变试验段孔壁开闭比的作用<sup>[2]</sup>。由于某跨声速风洞试验段搓板机构存在“动板”错动困难、定位精度不高、重复性较差、不利于人员现场检查动板错动情况等问题。为进一步优化和改进风洞的流场品质, 并满足未来新喷管流场调试的需要, 研制了新的控制系统。

## 1 技术指标和要求

1) 将上、下各 6 组电动推杆机构的驱动系统更换为交流伺服系统;

2) 搓板的运动行程为 0~50 mm, 定位精度优于 0.5 mm;

3) 同组电动推杆能同步运行, 出现异常应及时报警。

## 2 搓板机构机械部分

搓板机构安装于试验段上、下壁板框架横向肋板处, 上、下壁板各 12 套, 分成 6 组, 分别驱动 42 块“动板”。每组的驱动形式为共轴双驱型, 即采用 2 套搓板机构同步驱动 1 根分段长轴, 从而带动 7 块“动板”, 通过控制“动板”相对于定板的位置, 实现试验段壁板通气孔开闭比的变化与调节。搓板机构工作原理示意图如图 1 所示。其搓板机构机械传动系统由电动推杆(包括电机、谐波减速器、螺母、轴和丝杠等)、连杆、十字滑块、分段长轴、耳片及耳座等件组成, 如图 2 所示。

为了解决原有搓板系统存在的“动板”错动困难等问题, 笔者重新设计传动系统中的连杆、耳片及耳座, 增大销轴与动板的距离, 克服干涉, 使动板移动顺畅; 同时, 对传动系统全面维修、润滑, 使各零部件达到机构的使用要求; 另外, 针对原有

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-06-18

作者简介: 芮伟(1975—), 男, 重庆人, 学士, 高级工程师, 从事机电一体化、计算机控制和复杂控制过程建模、仿真与实现研究。

驱动电机为步进电机形式，为了克服其启动频率过高或负载过大易出现丢步或堵转的现象，将驱动电机形式更新为交流伺服电机。如何实现伺服电机与减速器的匹配问题，根据螺旋传动螺杆轴向载荷与螺纹力矩之间的关系：

$$T = F \frac{d_2}{2} \tan(\lambda + \rho')$$

其中： $T$  为扭矩； $F=15\ 072\text{ N}$ 为轴向力； $d_2=0.037\text{ m}$ 为丝杠半径； $\lambda=\arctan S/\pi d_2$ 为螺纹开角； $f=0.1$ 为摩擦系数； $S=0.006\text{ m}$ 为导程； $\rho'=\arctan f/\cos(\alpha/2)$ ， $\alpha=30^\circ$ 为牙形齿。由于减速器的减速比为100，因此选定电机的额定功率为0.2 kW，额定转矩为0.637 N·m，额定转速为3 000 r/min。

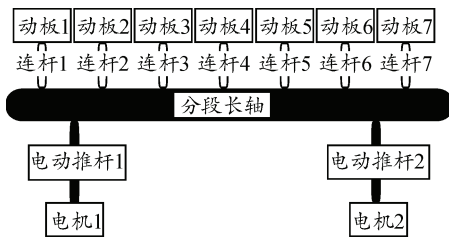


图 1 搓板机构

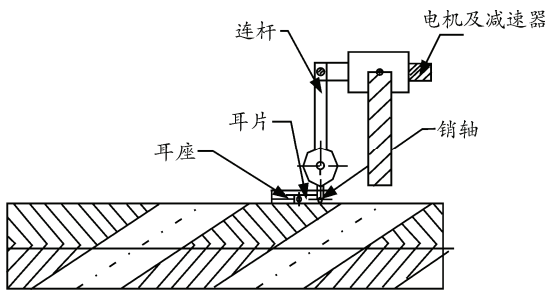


图 2 搓板机构机械传动

### 3 搓板机构控制系统

#### 3.1 硬件设计

新控制系统部分采用美国 DELTA TAU 公司的独立型可编程多轴运动控制器-UMAC 运动控制器。上下搓板机构控制系统各自独立，包括 18 插槽 ACCR3 机架(含背板电源)各 1 个，CPU 模块(UMAC Turbo CPU/Communication, 80 MHz)各 1 块，运动控制模块(ACC-24E2A+OPT1A, 每块 4 轴)各 3 块，安川绝对编码器信号接收模块(ACC-57EY+OPT1, 每块接收 4 个编码器信号)各 3 块，开关量 I/O 模块(ACC-65E, 24 IN/24 OUT 光电隔离 I/O)各 1 块，模拟量采集模块(ACC-36E, 16 路输入, 12 位 A/D)各 1 块。交流伺服系统采用日本安川的伺服电机和伺服驱动器，伺服电机选用安川伺服 SGMAH-02A1A41 型伺服电机，额定转速 3 000 r/min，带 16 位绝对编码器。伺服驱动器选用 SGM-02ADA 型伺服驱动器，额定输出功率为 0.2 kW。为方便操作，在驻室内安装 2 台现场手动操作器，可分别对上壁板搓板机构和下壁板搓板机构进行操作，操作人员可使用操作器，通过以太网发送控制命令到工控机系统，实现对各搓板机构的位置控制。操作器选用美国 Z-World 公司 OP7210 操作器，微处理器是 Rabbit 2 000/22.1 MHz，带 10Base-T/RJ-45 以太网口，闪存 256 K，SRAM128K (standard)。现场操作器开发软件为 Dynamic C 软件，Dynamic C 是用于编写嵌入式应用软件的一套集成的开发系统。控制系统框图如图 3。

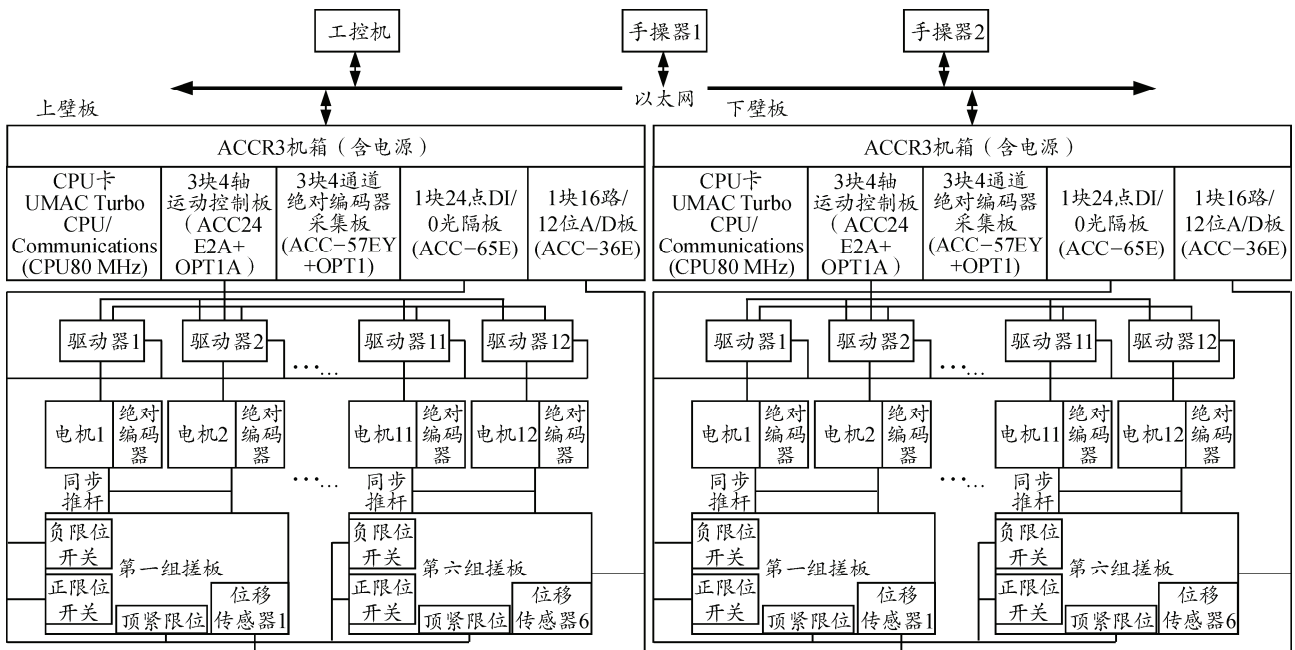


图 3 控制系统框图

### 3.2 软件设计

上位机软件开发平台采用 VC++6.0 开发，通过 PcommServer 驱动程序与 UMAC 建立通信，该软件包是美国 Delta Tau 公司提供的 PMAC 32 位通信驱动程序，实现了主机与 PMAC 控制器之间的所有通信通道，包含了与 PMAC 的所有通信方法。

整个软件主要实现以下功能：

- 1) 各搓板机构的系统运行调试。根据用户需要既可以让搓板同时动作，也可仅选取其中的几组动作。
- 2) 试验运行控制功能。根据不同马赫数的要求，控制搓板机构运行。以图形或数据的形式实时地显示各搓板机构位置、抱闸以及各种状态指示等。
- 3) 系统配置功能。配置伺服驱动器、运动控制卡的参数，读取伺服驱动器中绝对编码器的数据等功能。流程框图如图 4 所示。

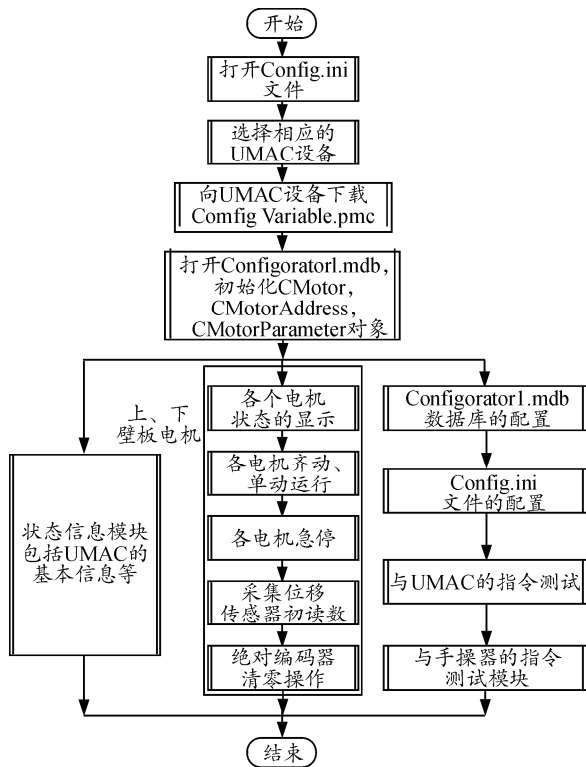


图 4 软件流程

### 3.3 基于UMAC的速度/加速度前馈 PID 控制

UMAC 控制器内部提供了 PID 伺服控制算法，它在传统 PID 控制算法的基础上增加了速度/加速度前馈，以减小系统的跟随误差；同时，UMAC 还提供了一个大阶跃/死区滤波器，用于限定每个伺服周期内最大定位误差和进行死区补偿；并且增加了陷波滤波器，用以改善系统的伺服性能。UMAC 伺服控制原理如图 5 所示。这种控制方法在理论上可以完全消除系统的静态位置误差、速度误差、加速度误差以及外界扰动引起的误差，使系统获得很好的鲁棒性<sup>[3-6]</sup>。

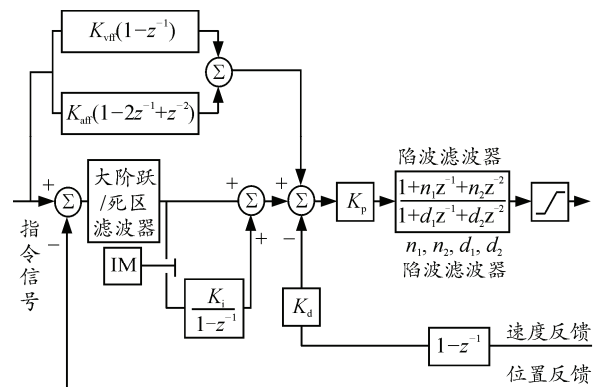


图 5 UMAC 内置复合 PID 控制原理

计算公式如下：

$$DAC(n) = K_p \{ P_1 [ E(n) + K_{vff} V(n) + K_{aff} A(n) + K_i I(n) ] - K_d P_2 V_1(n) \}$$

其中： $P_1$  为位置环放大系数； $P_2$  为速度环放大系数； $E(n)$  为伺服周期内的跟随误差； $V(n)$  为伺服周期内的指令速度； $A(n)$  为伺服周期内的指令加速度； $I(n)$  为伺服周期内的跟随误差积分； $V_1(n)$  为伺服周期内的实际速度； $K_p$  为比例增益； $K_i$  为积分增益； $K_d$  为微分增益； $K_{vff}$  为速度前馈增益； $K_{aff}$  为加速度前馈增益。PID 参数对应的 UMAC 控制器中的地址如表 1。

表 1 PID 的参数

序号	名称	地址	作用
1	$K_p$	Ixx30	伺服环的比例增益，影响系统的刚性
2	$K_d$	Ixx31	伺服环的微分增益，提供给系统阻尼
3	$K_i$	Ixx33	伺服环的积分增益，减小系统的稳态误差
4	$K_{vff}$	Ixx32	伺服环的速度前馈增益，减小系统的跟随误差
5	$K_{aff}$	Ixx35	伺服环的加速度前馈，消除系统在加减速时的跟随误差
6	IM	Ixx34	积分模式开关
7	$n_1, n_2, d_1, d_2$		通过调整陷波滤波器各系数的值，可以过滤掉驱动信号中与机床固有频率相近的频率信号分量，避免引起共振现象，提高系统的抗干扰能力

### 3.4 同步控制策略

搓板机构为共轴双驱型机构，每组 2 套电动推

杆机构通过机械方式耦合，需要保持同步控制。常用的同步方式有 3 种：1) 同等方式，即指根据多个

对象所需要的相同运动要求产生同步的运动命令，得到设定的理想输出；2) 主/从模式，该模式下需要设置 1 个主电机和 1 个副电机，主电机直接接收带有目标轨迹的运动指令，而副电机接收的指令轨迹是由主电机的实际轨迹所决定；3) 交叉耦合控制，主要是将 2 台电机的速度或位置信号进行比较，从而得到 1 个差值作为附加的反馈信号。将这个附加的反馈信号作为跟踪信号，系统能够反映出任何 1 台电机的负载变化，从而获得良好的同步控制精度。该模型对干扰和负载的变化适应性最强，应该能取得最好的控制效果。通过分析共轴双驱导轨的结构特点和运行的实际情况，对双驱电机采用交叉耦合控制。交叉耦合控制原理如图 6 所示。

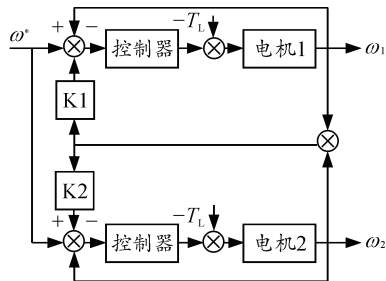


图 6 交叉耦合控制原理

### 3.5 安全连锁设计

由于搓板机构同步驱动的轴长、连接的动板多，

且使用了传动比较大的国产减速系统，引入了摩擦和间隙环节，以及交流伺服电机的非线性、特性的不匹配性、转矩有界性、负载和跟踪曲线的不确定性等容易出现别卡的现象，因此在安全连锁方面采取了以下措施：

1) 在位置闭环控制中，在每组中的 1 块动板上安装 1 个位移传感器作为主反馈，有效消除传动系统带来的误差；同时，实时换算同组 2 个电机绝对式编码器的位置，当 3 个位置信号差异较大时，进行报警。

2) 设计了一个状态观测器，实时监测同组电机的控制电压和转速值，当同组电机转速突变或 2 个电机的转速不匹配时，进行报警。

3) 每组搓板机构安装了位置限位，防止搓板位置超过限位。

## 4 应用结果

通过努力，先后完成了系统的研制任务，并成功应用风洞试验段的流场调试，应用结果充分证明：

1) 改造后的控制系统设计合理，运动控制平稳可靠。

2) 正反向定位精度优于 0.5 mm，同组中 2 台电机的同步效果良好，达到设计指标要求，满足试验要求，测试结果如表 2。

表 2 测试结果

电机组	给定	反馈	mm		电机组	给定	反馈	mm	
			给定	反馈				给定	反馈
上 1 组	10	10.23	-10	-10.16	下 1 组	10	9.93	-10	-9.93
上 2 组	10	10.16	-10	-10.02	下 2 组	10	9.77	-10	-10.30
上 3 组	10	10.09	-10	-9.77	下 3 组	10	10.16	-10	-10.02
上 4 组	10	10.23	-10	-10.23	下 4 组	10	10.09	-10	-9.86
上 5 组	10	10.09	-10	-9.70	下 5 组	10	10.02	-10	-9.94
上 6 组	10	9.63	-10	-9.77	下 6 组	10	9.63	-10	-9.77

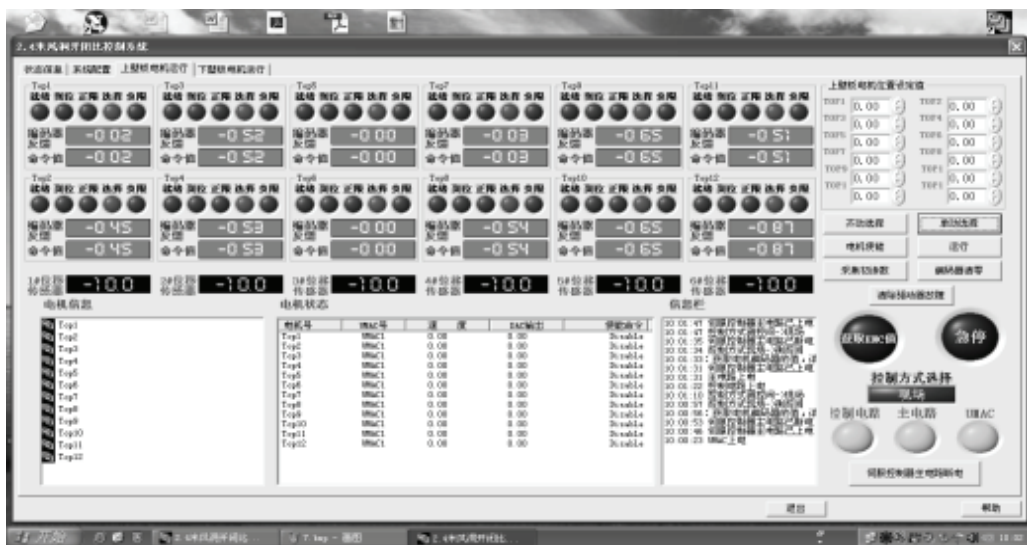


图 7 软件操作界面

3) 整个系统人机界面友好, 操作人员使用维护方便, 极大地提高了试验的准备效率, 操作界面如图 7。

### 5 结束语

研制的控制系统采用通用运动自动控制器+交流伺服系统的硬件平台, 位置控制算法采用 UMAC 的速度/加速度前馈 PID 控制算法, 同步控制策略采用交叉耦合同步策略, 满足了共轴双驱型开闭比调节装置的技术要求, 达到设计指标要求。该项研究可为类似的多轴同步控制提供借鉴。

### 参考文献:

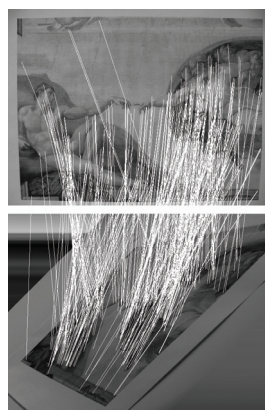
[1] 屈科, 张正科, 高超, 等. 用数值模拟方法确定跨音速

\*\*\*\*\*

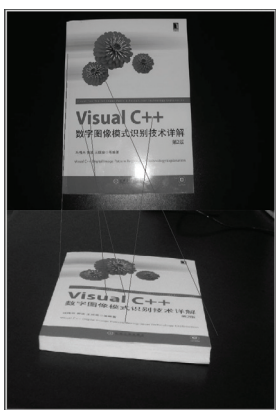
(上接第 55 页)



(a) SIFT 算法匹配结果



(b) 文中算法匹配结果



(c) SIFT 算法匹配结果



(d) 文中算法匹配结果

图 5 图像匹配试验结果

表 1 试验结果对比

试验图像	正确匹配点对	
	SIFT 算法	文中算法
1	0	330
2	1	542

风洞几何参数[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(28): 6915-6921.

[2] 恽起麟. 实验空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 121-121.

[3] 徐战波, 李增强, 孙涛. 基于 UMAC 的高精度空气静压主轴控制系统研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(4): 28-30.

[4] 左培良, 李东升, 高思田, 等. 共轴双驱型导轨精密定位与同步性的研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 16-18.

[5] 赖国庭, 吴玉厚, 富大伟. 基于 PMAC 的直线电机速度加速度前馈控制[J]. 控制工程, 2003, 10(6): 555-557.

[6] 薛开, 吕元元, 祝海涛. 运动控制器的 PID 参数整定[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(5): 655-657.

### 4 结论

笔者借鉴 SIFT 算法模拟和归一化相结合的思想, 对引起图像仿射变化的相机光轴纬度角和经度角进行了模拟, 并采用 SIFT 算法进行特征检测。试验结果表明: 当图像发生相对斜率较大的仿射变换时, 文中描述的图像特征检测和匹配算法仍有较强的抵抗能力。在图像寻的制导中, 当利用无人机等空中侦察平台获取的目标模板图像对图像自寻的导弹/炮弹进行导引时, 由于弹丸是在弹道末端从倾斜角度拍摄目标区图像, 而空中侦察设备获取的目标图像通常是垂直地面拍摄的正视图像, 二者的拍摄角度差异较大, 图像将发生类似试验中的大视角仿射变换, 此时可利用文中的算法对二者进行有效匹配。当然, 文中的算法只是模拟了有限个图像倾斜引起的仿射变换, 对于数学上具备完全意义的抗仿射变换算法还需做进一步的研究。

### 参考文献:

[1] 王永明, 王贵锦. 图像局部不变性特征与描述[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 1-3.

[2] Mikolajczyk K, Tuytelaars T, Schmidc, et al. A comparison of affine region detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 65: 43-72.

[3] Lowed D G. Distinctive image features from scale-invariant key points[J]. IJCV, 2004, 60(2): 91-110.

[4] 李德仁, 等. 基础摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 2005: 102-105.

[5] Jean-Michel Morel, Guoshen Yu. ASIFT: A New Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 438-468.