

高精度稳定平台伺服控制系统仿真实现

雷 杨, 李 军, 李绍军, 吴 晨
(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

摘要: 为满足稳定平台快速隔离扰动、稳定视轴的要求,通过优化控制结构和控制算法改善系统控制性能。在速度闭环控制的基础上,引入电流内环,提高直流力矩电机的力矩控制精度;采用串联超前滞后校正装置提高系统的隔离度和稳定裕度;利用模糊控制器在线整定PID控制器参数,提高系统动态性能。Simulink仿真表明,系统在常值力矩、周期性力矩及周期性角速率干扰下隔离扰动,具有响应速度快、隔离度好、稳定性高等特点。

关键词: 稳定平台; 伺服控制; 电流环; 校正; 模糊控制

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0072-05

Simulation Realization of High Precision Stabilized Platform Servo Control System

LEI Yang, LI Jun, LI Shao-jun, WU Chen

(School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To satisfy the requirements for isolating disturbances and stabilizing optical axis of a stabilized platform, the performance of the system control is improved by optimizing the control structure and control algorithms. On the basis of the speed closed-loop control, the current inner loop is loaded to improve the torque control accuracy of the DC torque motor. The isolation and the stability margin of the system is improved by cascading the lead and lag correction device. The fuzzy controller tuning PID controller parameters is used to improve the system dynamic performance. Simulink simulation shows that: The system isolating disturbance under constant torque value, periodic disturbance torque and periodic disturbance angular rate has the characteristics of fast response, good isolation effect and high stability.

Key words: stabilized platform; servo control; current loop; correction; fuzzy control

0 引言

陀螺稳定平台作为稳定视轴或瞄准线的主要手段^[1],多年来一直是国内外科研机构的主要研究对象。陀螺稳定平台主要用来消除平台受到的干扰,使平台能够按照既定的方向运动或者在惯性空间中保持稳定,保证平台负载能够精确稳定地跟踪目标^[2]。国内外学者对稳定平台的研究多侧重于控制算法的创新与改进,研究热门的控制算法有模糊-PID控制、神经网络算法控制、自抗扰控制等。文献[3]提出基于RBF神经网络辨识的模型参考自适应控制算法,频率为5 Hz的正弦扰动下隔离度为0.7%;文献[4]采用变论域模糊PID控制算法提高光电跟踪系统精度,但阶

跃响应的超调量仍达到40%;文献[5]设计了一种复合自适应模糊PID控制器,频率为5 Hz的正弦扰动下隔离度为0.45%。而本文通过优化系统的结构和控制算法,使系统隔离扰动能力强,且响应速度快,稳定性高,阶跃响应超调量低,有效解决系统动态性能和高稳定精度之间的矛盾。

1 稳定平台结构及原理

稳定平台结构设计采用双轴或三轴正交的框架式结构,不同方向轴结构类似,均由负载、执行器、测量元件、功率放大器组成。其中:负载为平台框架及安装在平台上的光电设备;执行器为直流力矩电机;测量元件为测量角速率的速率陀螺仪和测量转角角度的旋转变压器;功率放大器采用PWM驱动方式。

稳定平台装置控制分为两种模式,即系统静止状态下的伺服控制和系统运动状态下的稳定控制。其

中:将静止状态伺服控制模式下旋转变压器的测量角度作为闭环反馈信号,控制易实现且效果较好;系统运动状态下的稳定控制较复杂,如何保证其稳定隔离精度是研究的重点。

稳定平台系统采用电流环、速度环、位置环三闭环控制结构。如果控制指令为速度指令,系统可简化为电流环、速度环双闭环控制结构,其结构简单,且速度环为外环能保证平台跟踪目标过程平稳,如图1所示。

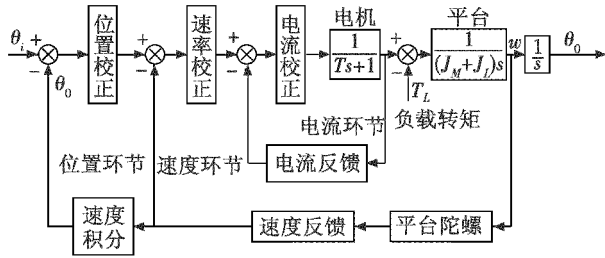


图1 稳定平台单轴控制框图

Fig.1 Block diagram of single-axis control of the stabilized platform

2 系统各环节模型

2.1 力矩电机模型

力矩电机电枢电路平衡方程经拉氏变换为

$$\begin{cases} \frac{T(s)}{U(s) - C_e w(s)} = \frac{C_T}{R} \cdot \frac{1}{T_e s + 1} \\ T(s) - T_L(s) = J_\Sigma s \cdot w(s) \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_e 为反电动势系数; C_T 为电机转矩系数; T_L 为负载转矩; J_Σ 为电机转子与负载转动惯量和; T_e 为电机的时间常数,且 $T_e = L/R$ 。结合平衡方程得到电机的数学模型如图2所示。

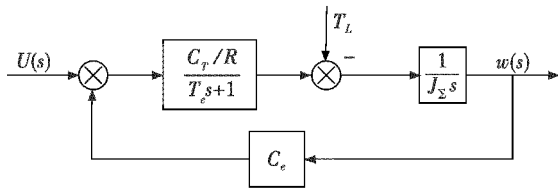


图2 直流力矩电机数学模型

Fig.2 DC torque motor mathematical model

由实际应用中力矩电机参数可以得到 $\frac{C_T/R}{T_e s + 1} =$

$\frac{0.023}{0.003s + 1}$, $C_e = 0.02 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$, 转动惯量 $J_\Sigma = 0.006 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。由于电机的反电动势系数 C_e 非常小,反馈对系统零点、极点的大小影响很小,故可省略。

2.2 速率陀螺数学模型

速率陀螺将电机输出角速度 $w(t)$ 转换为对应电压量 $u_g(t)$ 。由于速率陀螺内部处于闭环工作状态,因此,其传递函数可以用二阶振荡环节的传递函数表示^[6],即

$$\frac{u_g(s)}{w(s)} = \frac{K_g}{T_n^2 s^2 + 2\zeta T_n s + 1} \quad (2)$$

根据实际应用的陀螺参数及信号采样处理电路可以推算出:陀螺仪截止频率处对应周期 $T_n = 0.002236\text{s}$, 阻尼比 $\zeta = 1.04$, 比例系数 $K_g = 3.74$ 。故传递函数为

$$\frac{u_g(s)}{w(s)} = \frac{3.74}{0.000005s^2 + 0.00467s + 1} \quad (3)$$

2.3 其他环节数学模型

系统回路中还有 AD 转换电路、PWM 驱动电路、硬件滤波电路等。由于 AD 转换电路和 PWM 驱动电路均由专用集成芯片构成,延迟时间均很短,数学模型可以等效为比例环节。硬件滤波主要考虑一阶 RC 无源滤波电路,其中, $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 0.1 \mu\text{F}$, 对应时间常数为 1 ms , 故数学模型为 $\frac{1}{0.001s + 1}$ 。

3 系统电流环的设计与仿真

3.1 电流环模型分析与设计

电流环控制电机电枢电流同时使电枢电流严格跟踪控制电压指令的变化,从而准确控制电机输出力矩^[7]。电流环作为控制系统内环提高系统响应速度和精度,实际系统中还可以提高系统静态力矩刚度。在实际系统中,PWM 电压输出与电机电流输出并非线性关系,其比值在低电流段较大,随着电流增加而减小,故增加电流环可以提高控制输出与电机输出力矩线性度,优化系统控制特性。同时,电流环能够削弱电机在低速运行时出现的“爬行”现象和换向时的“平顶”情况。

电流采样的硬件电路通过电阻采样、电压信号差分放大、低通滤波、AD 采样实现,低通滤波采用一阶 RC 滤波电路。

3.2 电流环模型仿真实现

电流环控制器选择加前馈的 PID 控制器能够达到很好的效果,其中,前馈控制能够迅速响应输入电压 U 的变化,PID 闭环控制能够准确控制力矩电机电流输出信号。控制框如图3所示。

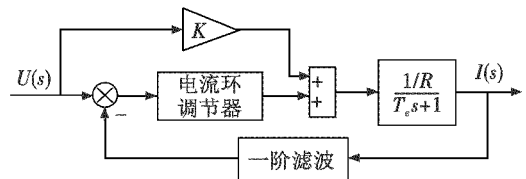


图3 电流环模型框图

Fig.3 Current loop model

图3中: $K = 6$; $R = 6$; $T_e = 0.003$; PID 控制器为 $5.8 + 5/s + 0.003s/(0.0002s + 1)$; 滤波模型为 $1/(0.001s + 1)$ 。仿真波形如图4所示,响应到达并保持在中值

$\pm 5\%$ 误差内的调节时间^[8] t_s 为 3 ms,超调量 $\sigma\%$ 为 0.5%。

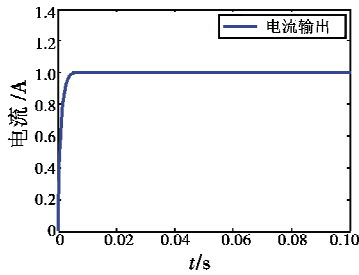


图4 电流环阶跃响应曲线

Fig.4 Current loop step response curves

4 高精度稳定平台仿真实现

4.1 双闭环PID控制

稳定平台系统在载体运动状态时的稳定控制模式下以电流环作为内环,以陀螺反馈的角速率信号作为外环的闭环反馈信号,实现平台上的光电设备快速稳定地跟踪速度输入信号。

当外环PID控制器参数为 $0.95 + 0.1/s + 0.005s/(0.001s + 1)$ 时,系统阶跃响应如图5所示,调节时间 t_s 为 33 ms,超调量 $\sigma\%$ 为 0.1%,在 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 常值力矩干扰下出现较大超调且动态调节过程较差。系统开环特性曲线如图6所示,截止频率为 14 Hz,相角裕度为 80.4° 。

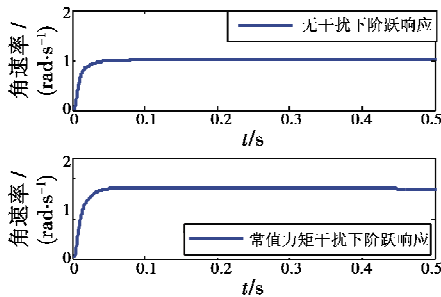


图5 阶跃响应曲线

Fig.5 Step response curve

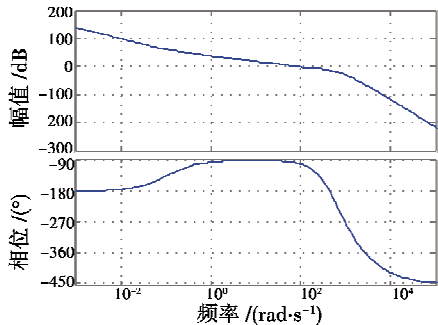


图6 系统开环波特图

Fig.6 Open-loop Bode plot

根据以上情况,要使系统在常值干扰力矩下的响应速度快,需适当增加外环PID控制器的积分项系数,

但积分系数越大,系统的超调量越大。最后确定PID控制器参数为 $0.95 + 5.0/s + 0.005s/(0.001s + 1)$ 。系统阶跃响应如图7所示,调节时间 t_s 为 85 ms,超调量 $\sigma\%$ 为 5.1%,在 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 常值力矩干扰下动态调节过程较先前有较大改善。系统开环特性曲线如图8所示,截止频率为 13.7 Hz,相角裕度为 78° 。

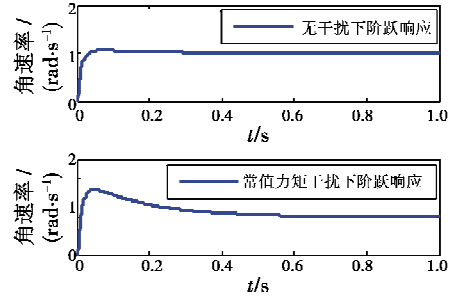


图7 阶跃响应曲线

Fig.7 Step response curve

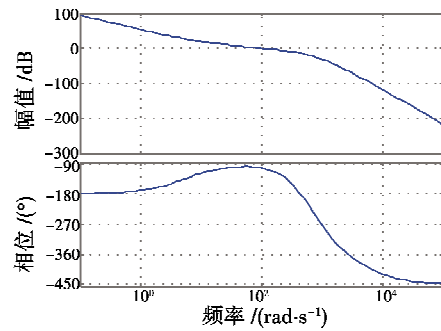


图8 系统开环波特图

Fig.8 Open-loop Bode plot

4.2 超前滞后校正

在载体运动状态时的稳定控制模式下,稳定平台系统是非0型系统,故系统的阶跃响应稳态误差为零,为无差度系统。带宽是频域中一个非常重要的性能指标,对于低阶系统,一般来讲带宽越宽响应速度越快,4.1节中系统的带宽约为 $120 \text{ rad/s} \approx 19.1 \text{ Hz}$,提高系统的开环截止频率,系统带宽增加。而从图9中分析可知,开环截止频率提高会使相角裕度降低,因此,折衷选择使系统开环幅频特性截止频率校正到 230 rad/s 。

当基座做角震荡运动时,所产生的干扰力矩会使平台做同步角震荡,平台震荡的幅值与基座角震荡的幅值之比就是稳定平台隔离度^[9]。根据本系统要求:在摇摆台振动为幅值 3° ,频率为 1 Hz 的周期性角速率干扰情况下隔离度需达到 0.2%。计算系统在 1 Hz 处的开环增益为

$$|G_0(j6.28)| = 20\lg\left(\frac{3}{3 \times 0.002 \times 2\pi} - 1\right) \approx 37.9 \text{ dB} \quad (4)$$

由图9可知,校正前系统开环幅频特性在 1 Hz (6.28 rad/s) 处的开环增益为 24.5 dB,需提升 13.4

dB 以上。要使校正后系统截止频率为 36.6 Hz (230 rad/s), 此处需提升 7.18 dB。为达到幅频特性的要求, 只需串联一个超前校正装置和一个滞后校正装置, 且超前校正装置的交接频率低于滞后校正装置交接频率, 经计算并根据仿真效果微调校正装置参数, 最后串联超前滞后校正装置的传递函数为

$$W_q(s) = \frac{(1/0.5s + 1)(1/40s + 1)}{(1/3s + 1)(1/15s + 1)} \quad (5)$$

4.3 模糊 PID 控制

文献[10]采用的是滞后-超前校正器, 超前校正装置的交接频率高于滞后校正装置交接频率, 使某个频带区域内系统开环增益降低。4.2 节为提高系统的隔离度, 通过串联超前-滞后环节提高系统低频处的开环增益, 但相应地增加了系统阶跃响应的超调量。设计一个模糊 PID 控制器代替 PID 控制器可解决超调严重的问题。一般系统的干扰幅值较小, 引起速度误差量的扰动信号幅值较小, 模糊控制器输出值相对 PID 控制器的控制参数影响较小, 但系统速度输入指令相当于阶跃跳变信号, 模糊控制器输出值对 PID 控制器的控制参数影响较大。故利用此原理可以降低系统阶跃响应的超调量。

由于模糊控制器为非线性控制器, 在速度输入为零时其控制输出的积分项在系统干扰下容易引起平台角度位置的漂移。综合考虑, 最终确定模糊控制器为双输入双输出模糊控制器。

模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊 PID 控制规则

Table 1 Fuzzy PID control rules

e	e _c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/PS	PB/NS	PM/NB	PM/NB	PS/NB	Z/NM	Z/PS
NM	PB/PS	PB/NS	PM/NB	PS/NM	PS/NM	Z/NS	NS/Z
NS	PM/Z	PM/NS	PM/NM	PS/NM	Z/NS	NS/NS	NS/Z
Z	PM/Z	PM/NS	PS/NS	Z/NS	NS/NS	NM/NS	NM/Z
PS	PS/Z	PS/Z	Z/Z	NS/Z	NS/Z	NS/Z	NM/Z
PM	PS/PB	Z/PS	NS/PS	NM/PS	NM/PS	NM/PS	NM/PB
PB	Z/PB	Z/PM	NM/PM	NM/PS	NB/PS	NM/PB	NM/PB

选取输入量 e 及其微分 e_c 的模糊子集: 负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (Z)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB)。e 和 e_c 的基本论域都为 [-6 6], 其量化因子分别为 2 和 0.01。输出量 ΔK_p, ΔK_d 的基本论域都为 [-2 2], 其比例因子分别为 0.4 和 0.01。模糊 PID 控制器的 Simulink 仿真模型如图 9 所示。模糊推理机根据不同时刻的条件 e 和 e_c, 利用模糊规则, 对 PID 的 K_p, K_d 两个参数进行在线自整定, 以满足不同的 e 和 e_c 条件下对参数的不同要求, 从而使被控对象具有较好的动、静态性能。

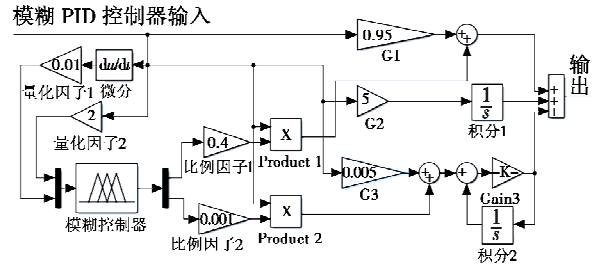


图 9 模糊 PID 控制器仿真模型

Fig. 9 Fuzzy PID controller simulation models

4.4 仿真结果及分析

系统的阶跃响应如图 10 所示。速度环的控制采用 PID 控制基本无超调, 调节时间为 85 ms; 在 PID 控制基础上串联超前滞后环节, 超调为 33.2%, 调节时间为 37 ms, 相比 PID 控制超调明显增加; 利用模糊控制器对 PID 的 K_p 和 K_d 参数实现在线自整定, 从响应曲线分析可知超调量为 14.1%, 调节时间为 52 ms, 相比固定 K_p, K_d 参数的 PID 控制方式下超调明显降低。

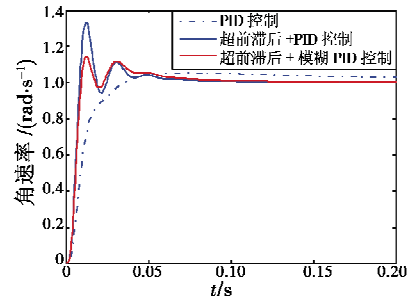


图 10 阶跃响应曲线

Fig. 10 Step response curves

系统角速率输入为零, 在幅值 3°, 频率为 1 Hz, 周期性角速率干扰情况下平台角度响应如图 11 所示, 从曲线分析计算得 PID 控制单独作用下隔离度为 0.99%。串联超前滞后环节后 PID 控制器和模糊 PID 控制器系统抗干扰效果相同, 隔离度都为 0.19%, 相比单独 PID 控制器作用抗干扰能力明显增强, 其在频率为 5 Hz 的正弦扰动下隔离度也能达到 0.4%, 优于文献[5]的隔离扰动能力。

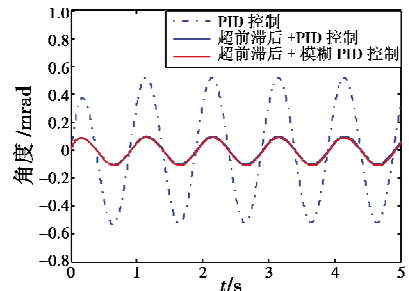


图 11 周期性角速率干扰下响应曲线

Fig. 11 Response curves of periodic interference angular rate

5 结 论

控制系统设置电流环可以加快系统响应且准确控制电机输出力矩;串联超前滞后校正网络能够提高系统隔离度,控制系统带宽,增加系统静态力矩刚度;利用模糊控制器在线整定 PID 控制器参数能有效解决系统动态性能和高稳定精度之间的矛盾。通过仿真最终确定的模型的稳定性很好,精度很高,为设计实际的高精度稳定平台系统奠定了理论基础。

参 考 文 献

- [1] 杨蒲,李奇.陀螺稳定平台自适应分层滑模速度控制[J].兵工学报,2008,29(7):864-869. (YANG P, LI Q. Adaptive hierarchical sliding mode speed control of gyro stabilized platform[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(7): 864-869.)
- [2] ZHANG H, KE X Z, JIAO R. Experimental research on feedback Kalman model of MEMS gyroscope[C]//The 8th International Conference on Electron Measurement and Instruments, 2007;253-256.
- [3] 沈晓洋,陈洪亮,刘昇.机载陀螺稳定平台控制算法[J].电光与控制,2011,18(4):45-50. (SHEN X Y, CHEN H L, LIU S. A control algorithm for airborne gyro-stabilized platform[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(4): 45-50.)
- [4] 仝昭军,刘珊中,李燕凡.机载光电跟踪平台的模糊自适应 PID 跟踪控制[J].电光与控制,2014,21(4):65-68. (TONG Z J, LIU S Z, LI Y F. Fuzzy self-adaptive PID tracking control for airborne EO tracking and pointing platform [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(4):65-68.)
- [5] 姬伟,李奇.陀螺稳定平台视轴稳定系统自适应模糊 PID 控制[J].航空学报,2007,28(1):191-195. (JI W, LI Q. Adaptive fuzzy PID control for LOS stabilization system on gyro stabilized platform [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1):191-195.)
- [6] 许德新.机载光电跟踪陀螺稳定技术[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007. (XU D X. Gyro-stabilized technology of airborne optical-electronic tracking [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.)
- [7] 庞新良.机载光电稳定平台数字控制关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007. (PANG X L. A study on key technology of digital control of airborne electro-optical stabilization platform system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)
- [8] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2008. (HU S S. Automatic control theory [M]. Beijing: Science Press, 2008.)
- [9] 秦永元.惯性导航[M].北京:科学出版社,2006. (QIN Y Y. Inertial navigation [M]. Beijing: Science Press, 2006.)
- [10] 夏静萍.多框架稳定跟踪伺服平台控制技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2010. (XIA J P. Research on control technology of multi-frame tracking and stabilization servo platform [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.)
- (上接第 62 页)
- detecting cars in UAV images [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International, Munich: IEEE, 2012;6868-6871.
- [4] 张全发,蒲宝明,李天然,等.基于 HOG 特征和机器学习的工程车辆检测[J].计算机系统应用,2013,22(7):104-107. (ZHANG Q F, PU B M, LI T R, et al. Vehicles detection based on histograms of oriented gradients and machine learning [J]. Computer System & Applications, 2013, 22(7):104-107.)
- [5] 华莉琴,许维,王拓,等.采用改进的尺度不变特征转换及多视角模型对车型识别[J].西安交通大学学报,2013,47(4):92-99. (HUA L Q, XU W, WANG T, et al. Vehical recognition using improved SIFT and multi-view model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 92-99.)
- [6] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [7] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]//The Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, 2: 1150-1157.
- [8] ZHAO G, CHEN L, SONG J, et al. Large head movement tracking using SIFT-based registration [C]//Proceedings of the 15th International Conference on Multimedia, ACM, 2007:807-810.
- [9] BEIS J S, LOWE D G. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces [C]//Proceedings IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 1997: 1000-1006.
- [10] VIOLA P, JONES M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2001:1-8.