

文章编号: 1672-8785(2017)05-0037-07

基于分段 PID 实现永磁同步电机快速启停控制技术研究

赖 浩^{1,2,3} 顾明剑^{2,3} 刘 涛^{2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049 ;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 扫描镜常用于获取空间光电信息, 应用中对其快速启停和指向精度有较高的要求。针对永磁同步电机驱动扫描镜的运动方式, 建立了电机 Simulink 仿真模型, 并采用了三闭环矢量控制策略, 提出了采用分段式比例积分微分 (Proportion Integration Differentiation, PID) 算法进行位置环控制的方法。结果表明, 相较于传统的 PID, 分段式 PID 提高了系统的响应速度, 同时控制精度和稳定性也有一定提升。

关键词: 分段 PID ; 快速启停; 矢量控制; Simulink 仿真

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.05.007

Research on Fast Start-Stop Control Technology of PMSM Based on Sectional PID

LAI Hao^{1,2,3}, GU Ming-jian^{2,3}, LIU Tao^{2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Scanning mirrors are often used to acquire space electro-optical information. Some applications have higher requirements for the fast start-stop response and pointing accuracy of scanning mirrors. According to the motion mode of a permanent magnet synchronous motor when it is driving a scanning mirror, a motor Simulink simulation model using three-closed-loop vector control strategy is established. A method which uses the sectional Proportional Integration Differentiation (PID) algorithm to control position loop is proposed. The results show that compared with the traditional PID, the sectional PID can enhance the response speed of the system. At the same time, it can also improve the control accuracy and stability of the system to a certain extent.

Key words: sectional PID; fast start-stop control; vector control; Simulink modeling

0 引言

为了适应高空间、高光谱分辨率和高定量

化遥感的需求, 人们对于空间光电扫描指向的精度要求日益苛刻。传统的扫描或指向有几种形式, 其中典型的空信息获取方式有推扫成

收稿日期: 2017-03-07

作者简介: 赖浩 (1993-), 男, 江西赣州人, 硕士生, 主要从事电机控制研究。 E-mail: laihau@163.com

* 通讯作者: 刘涛 E-mail: liutao@mail.sitp.ac.cn

像、凝视成像和光机扫描成像。红外高光谱大气探测仪是应用于风云三号 (02) 批 04 星及其后续卫星的有效载荷, 主要用于全球大气温度、湿度廓线分布的探测。由于该仪器被装载在极轨卫星上, 为了提高在对地探测时间内对目标的观测时间, 它采用了光机扫描驻留成像的方式, 因此需要用电机来实现快速步进启停的功能。

步进电机步进扫描使这种开环控制的方式, 会使电机因受外界影响而使震动加剧、噪声增大、负载能力下降, 严重时甚至会失步^[1]。随着计算机技术、现代控制理论的发展, 构建响应和高控制精度的伺服扫描指向系统成为一种可能。永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单、体积小、效率高等优点, 能够满足系统对于高精度、快响应的需求。

1 PMSM 数学模型

为了分析 PMSM 的控制策略, 本文首先进行建模和仿真, 并在此基础上进行相应的控制算法研究。假设 PMSM 定子绕组反电动势为正弦波, 转子没有阻尼绕组, 忽略铁心饱和, 且不考虑涡流和磁滞损耗^[2], PMSM 在 d-q 旋转坐标系下的定子电压方程为

$$U_{sd} = R_s i_d + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega \psi_{sq} \quad (1)$$

$$U_{sq} = R_s i_q + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega \psi_{sd} \quad (2)$$

磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n (i_q \psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_d i_q) \quad (4)$$

对于表面式 PMSM, 有 $L_{sd} = L_{sq} = L$, 则有

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q \psi_f = \frac{3}{2} p_n (\psi_{sd} i_q - \psi_{sd} i_d) \quad (5)$$

又 $i_d = 0$, 可得:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_{sd} i_q \quad (6)$$

机械方程为

$$T_e = T_L + B\omega + \frac{J}{p_n} \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

式中, U_{sd} 、 U_{sq} 为 dq 轴的定子电压; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 为 dq 轴的定子磁链; i_d 、 i_q 为 dq 轴的定子电流; L_{sd} 、 L_{sq} 为 dq 轴的定子电感; ψ_f 为永磁体所产生的磁势; p_n 为极对数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; ω 为机械角加速度; B 为摩擦系数; J 为转动惯量。

2 PMSM 系统模型的建立

PMSM 系统的特点是强耦合和非线性, 这使得其控制策略也较复杂^[3]。PMSM 通常采用 $i_d=0$ 的矢量控制算法, 在电机电磁转矩方程和坐标变换的基础上, 其可拥有和直流电机类似的转矩控制特性。

在分析上述 PMSM 数学模型的基础上, 搭建 PMSM 位置环、速度环和电流环三环矢量控制仿真系统, 系统框图如图 1 所示。通过模数转换器采样得到两相电流 I_a 、 I_b , 经过 Clarke 变换由三维坐标系变换到两相静止坐标系, 再经过 Park 变换到 dq 轴旋转坐标系中, 得到电流信号分量 I_d 、 I_q 和参考输入 $I_{sd}(I_{sd}=0)$ 、 I_{sq} ; 比较这些分量后, 将其馈入电流环 PID 控制器; 经过逆 Park 变换和空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM), 得到脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 波形, 将其输入到三相逆变器中以控制 PMSM 转动。位置环用以明确当前扫描镜所处的角度位置, 该环的设置位置与角度传感器反馈位置相减得到位置误差, 经校正环节校正后产生速度调整输出, 馈入速度环^[4]。速度环主要用来完成速度校正; 通过设置恰当的参数, 能最大程度地提高速度环的性能。

本文在 Matlab/Simulink 的环境下对整个系统进行建模仿真, PMSM 的相电流和速度位置信息可被直接读取出来。所以, 在仿真环境中将速度估计、位置传感器、Park 变换和 Clarke 变换略去。接下来重点介绍框图中的 SVPWM 模块、Park 逆变换模块、电流环、速度环和位置环控制器模块。

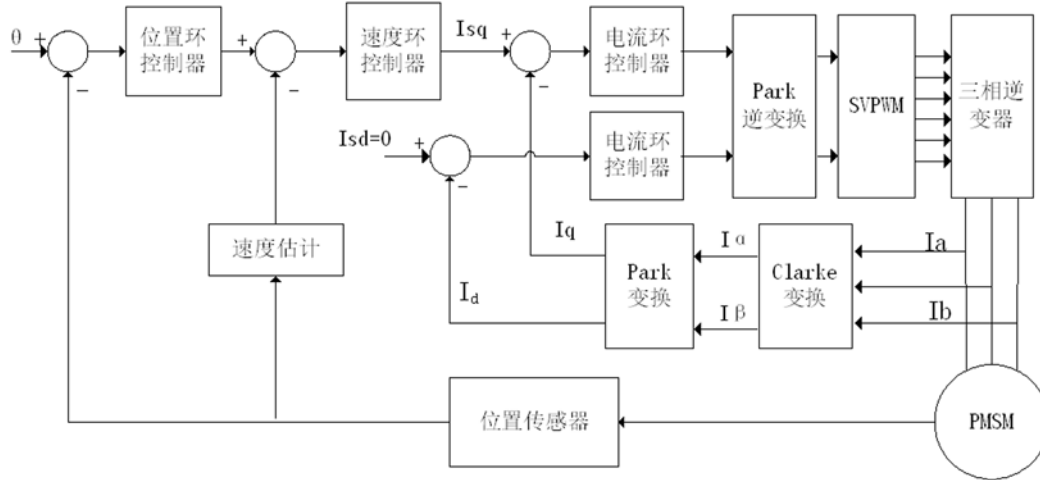


图 1 PMSM 矢量控制框图

2.1 SVPWM 模块

SVPWM 技术把逆变器和电机当作一个整体, 由电压空间矢量组合得到幅值恒定的圆形磁场, 进而给出逆变器的开关模式并输出 PWM

波形, 以驱动 PMSM 运动。SVPWM 子系统模块由 4 个模块组成, 分别是扇区号产生模块、 X 、 Y 、 Z 产生模块、 t_1 、 t_2 产生模块和六路 PWM 波产生模块。SVPWM 仿真模块如图 2 所示。

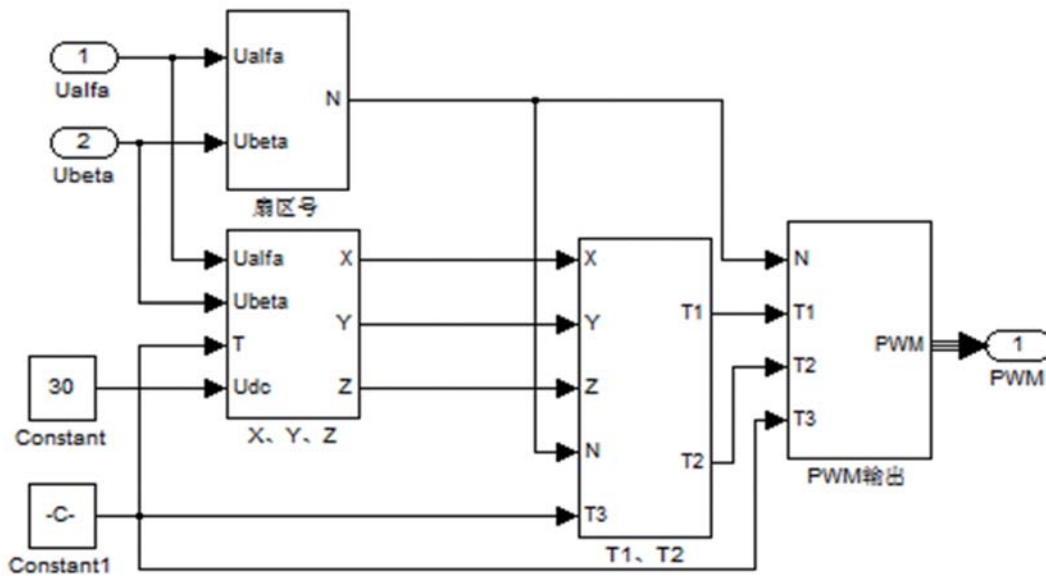


图 2 SVPWM 模块

2.1.1 扇区号产生模块

输入为 U_{α} 和 U_{β} , $B_0 = U_{\beta}$, $B_1 = \frac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha} - U_{\beta})$, $B_2 = \frac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha} - U_{\beta})$, 可以得到 B_0 、 B_1 和 B_2 。当 $B_0 > 0$ 时, $a=1$, 否则 $a=0$; 当 $B_1 > 0$ 时, $b=1$, 否则 $b=0$; 当 $B_2 > 0$

时, $c=1$, 否则 $c=0$ 。定义 N 为 $N = 4c + 2b + a$, 可得扇区号产生模块。

2.1.2 X 、 Y 、 Z 产生模块

由 $X = U_{\beta}$, $Y = \frac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha} + U_{\beta})$, $Z = \frac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha} + U_{\beta})$, 可得 X 、 Y 、 Z 产生

模块。

2.1.3 T_1 、 T_2 产生仿真模块

不同扇区 T_1 和 T_2 对 X 、 Y 、 Z 而言的表达式见表 1，由此可得 T_1 、 T_2 产生模块。

表 1 不同扇区 T_1 和 T_2 相对于 X, Y 和 Z 的定义

Sector	I	II	III	IV	V	VI
T_1	-Z	Z	X	-X	-Y	Y
T_2	X	Y	Y	Z	-Z	-X

2.1.4 六路 PWM 波产生模块

由 $t_{aon} = \frac{1}{2}(PWMPRD - t_1 - t_2)$ ， $t_{bon} =$

$t_{aon} + t_1$ ， $t_{con} = t_{bon} + t_2$ 可得变量 t_{aon} 、 t_{bon} 和 t_{con} 。根据扇区将正确的持续时间周期分配给 T_a 、 T_b 和 T_c 。输入 T_a 、 T_b 、 T_c ，和三角波模块相比较，大于三角波，则 PWM 波输出 1，否则输出 0，最终六路 PWM 波输出到逆变器中。

2.2 Park 逆变换模块

Park 逆变换模块将 U_d 、 U_q 的值由旋转坐标系变换到两相静止坐标系，将从 PMSM 采样得到的电角度乘以六对极，便可以得到机械角度 Theta。其变换模块如图 3 所示。

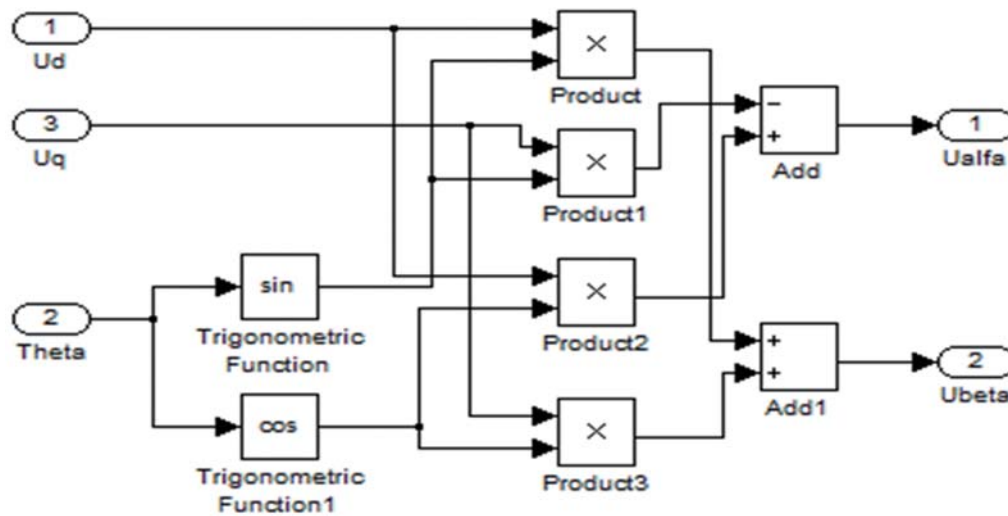


图 3 Park 逆变换模块

2.3 电流环控制器模块

PID 控制算法即比例—积分—微分控制，具有形式简单、容易实现的特点，且鲁棒性强，广泛应用在工业控制领域^[5]。偏差值 $e(t)$ 是参考值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 间的差值： $e(t) = r(t) - c(t)$ ； $u(t)$ 为偏差值 $e(t)$ 的比例项，由积分项和微分项相加后得到，其时域表达式为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt}] \quad (8)$$

式中， K_p 为比例系数， T_I 为积分时间常数， T_D 为微分时间常数。

可将电流环看做一阶小惯性环节，系统校正为 I 型系统，可选择比例微分 (Proportion In-

tegration, PI) 调节器来抵消控制对象中的惯性环节，以加快系统响应。

电流环分为两路 PI 控制通路：

(1) 针对 I_q 的调节模块

其输入为电机速度环的输出参量 I_{sq} 和电流采样变换后的 q 轴分量 I_q ，经过 PI 参数调节后作为电流环输出 U_q 。

(2) 针对 I_d 的调节模块

由于本电机采用 $i_d=0$ 的矢量控制算法，其输入为 $I_{sd}=0$ 和电流采样变换后的 d 轴分量 I_d ，经过 PI 参数调节后作为电流环输出 U_d 。

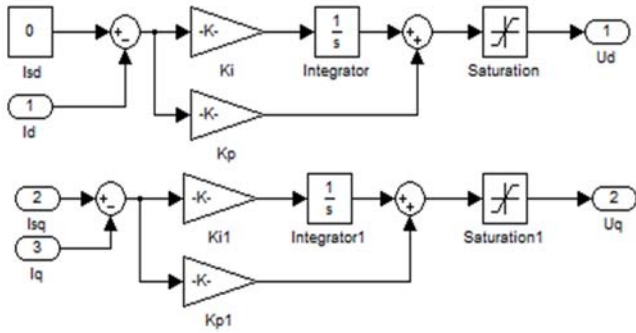


图 4 电流环控制器模块

2.4 速度环控制器模块

为了消除速度的静差, 速度环也用 PI 调节器校正成 II 型系统。输入为电机位置环输出和电机转速采样的速度 w_m , 经过 PI 参数调节后作为速度环输出。图 5 所示为速度环控制器模块。

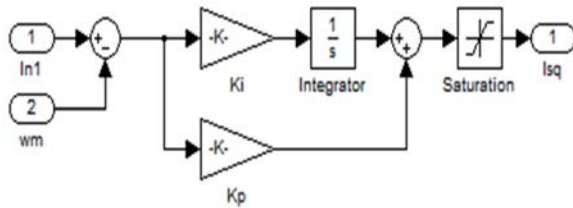


图 5 速度环控制器模块

2.5 位置环控制器模块

由于扫描镜一直处于快速步进扫描状态, 速度变化较大, 容易出现较大偏差, 将这些偏差

当作反馈量引入控制, 可能会产生系统振荡。因而对位置环采用分段 PID 控制算法, 可在保证电机响应速度的同时减小系统超调和振荡。

分段 PID 控制算法的表达式为

$$u(k) = \alpha \cdot K_p e(k) + \beta \cdot K_I \sum_{j=0}^k e(j)T + \frac{K_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (9)$$

分段 PID 控制算法的思想如下:

(1) 根据工程经验和实际调试整定, 设定偏差阈值 $\varepsilon > 0$ 。

(2) 当系统满足 $|e(k)| > \varepsilon$ 条件时, 说明系统偏差太大。采用 PD 调节, 选用适当的 K_p 参数系数 α , 同时, 设置 K_I 参数系数为 0。由于电机刚开始运动时, 加速度和位置的变化较大, 位置环 PID 调整输出较大。因此, 在此时选取相对较小但能满足电机响应时间的 K_p 参数系数 α , 以保证其超调量不至于太大。

(3) 当系统满足 $|e(k)| \leq \varepsilon$ 条件时, 偏差处于较小的区间。为了提高电机的响应速度, 可选用较大的 K_p 参数系数 α , 并通过加入适当的 K_I 参数系数 β 来进行调节, 使电机可以实现较快的位置修正。

图 6 所示为位置环控制模块。

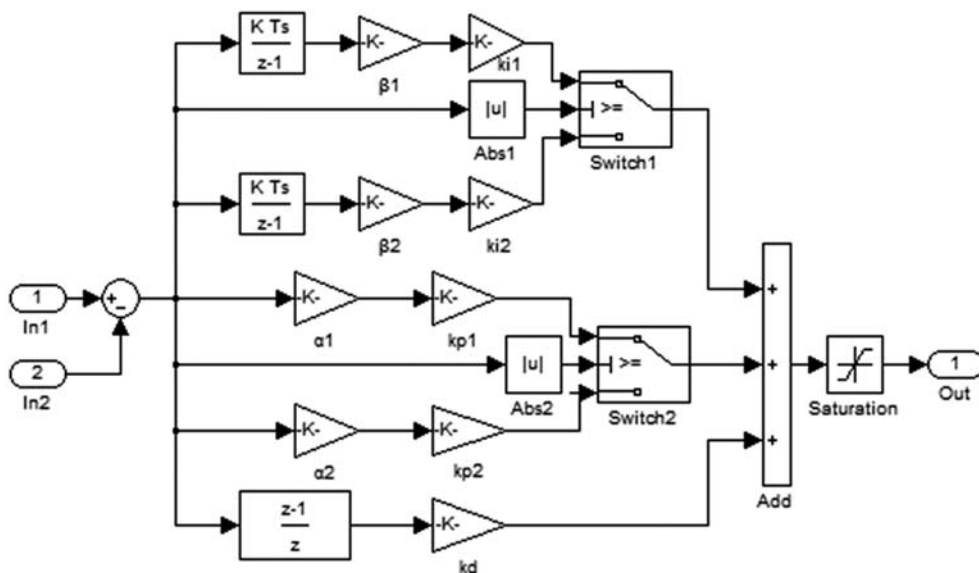


图 6 位置环控制模块

三相逆变器 和 PMSM 模块可以直接在 Simulink 库中调用。按照图 1 所示的控制框图

将各个子模块组合在一起，搭建出三环矢量控制系统仿真模型，如图 7 所示。

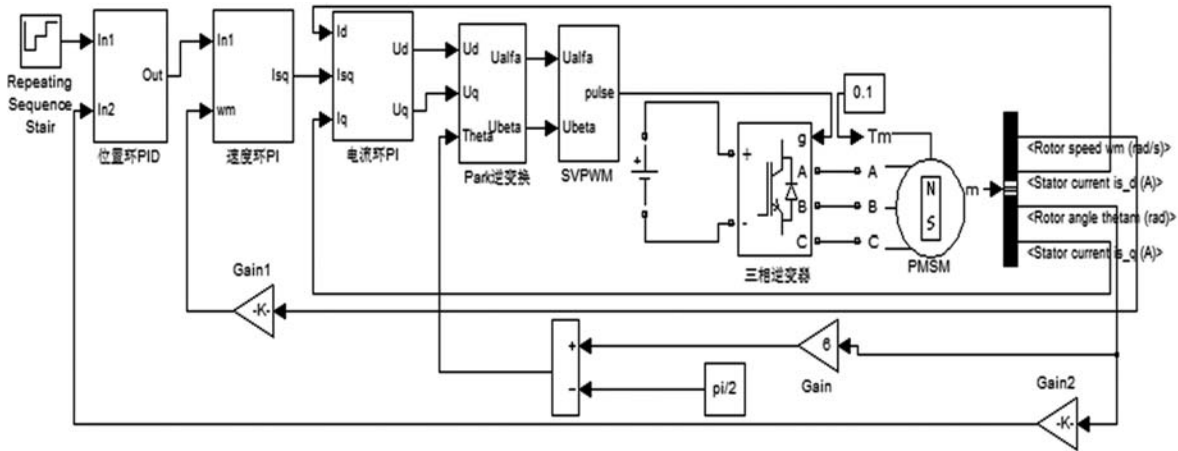


图 7 三环矢量控制系统仿真模型

3 仿真结果

在 Simulink 环境下对上述三环矢量控制系统进行仿真。PMSM 参数设置是，定子相电阻 $R_s=11.2\text{ Ohms}$ ，电枢电感 $L=31.2\text{ mH}$ ，转动惯量 $J=0.00095\text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ ，静摩擦力 $T_f=0.00001\text{ N}\cdot\text{m}$ ，极对数 $n_p=6$ ，电机力矩常数为 $0.95\text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$ ，输入母线电压 $U_{dc}=30\text{ V}$ 。系统带负载 $T_m=0.1\text{ N}\cdot\text{m}$ 启动，位置环输入为 0.1 弧度 (5.7°) 步进阶跃输入。

分别采用传统的 PID 和分段 PID 对 PMSM 三闭环模型中的位置环进行仿真，选取 0.01 为阈值，以 0.1 弧度为阶跃， 220 ms 为一个阶跃周期，可得到传统和分段 PID 位置环步进输出的响应曲线，如图 8 所示。

传统和分段 PID 位置环输出误差曲线如图 9 所示。

图 9 中，传统和分段 PID 参数都已进行整定优化，响应时间和位置稳定度都较好。图 8 的位置环输出响应曲线表明，相较于传统的 PID 控制，分段 PID 控制 PMSM 步进运动可提高位置环的响应速度，减小调整时间，同时还可提高电机的稳定性，能更好地满足系统对扫描镜快速启停控制的要求。图 9 的位置环输出误差曲线

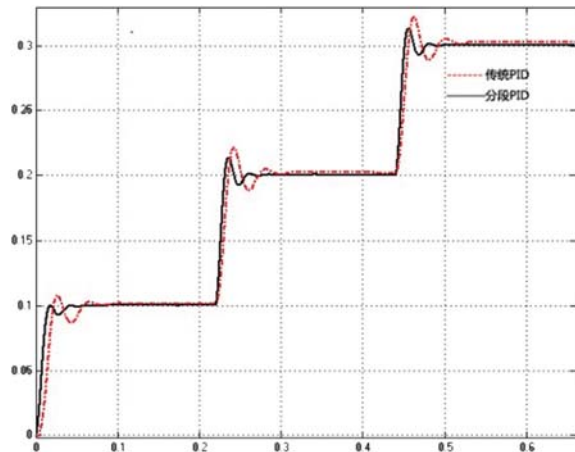


图 8 传统和分段 PID 位置环步进输出的响应曲线

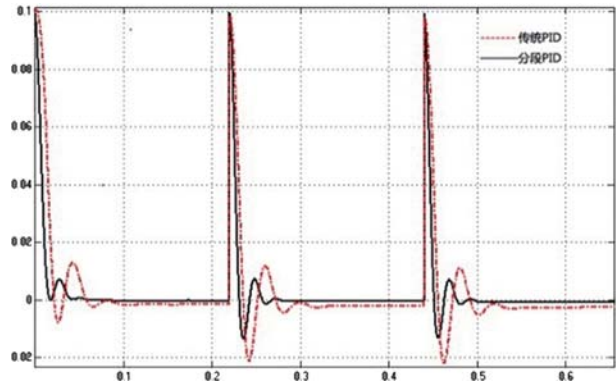


图 9 传统和分段 PID 位置环步进输出误差曲线

表明，相较于传统的 PID 控制，分段 PID 的控制

精度和响应速度都得到了优化。表 2 为传统 PID 和分段 PID 的控制性能参数, 可进一步看出, 前者超调量小, 调整时间短, 标准差也较小。

表 2 分段 PID 和传统 PID 的控制性能参数

		超调量	调整时间	标准差
分段 PID	步进 1	18.88 ′	40 ms	6.798 ″
	步进 2	25.75 ′	36 ms	7.828 ″
	步进 3	24.72 ′	37 ms	7.931 ″
传统 PID	步进 1	50.47 ′	59 ms	36.05 ″
	步进 2	45.32 ′	72 ms	22.66 ″
	步进 3	43.26 ′	73 ms	31.93 ″

4 结束语

针对空间光电扫描指向快速步进启停和高精度指向的要求, 对系统进行了建模仿真, 并在位置环采用了传统和分段 PID 两种控制算法。相较于传统的 PID 控制算法, 适当的位置环分

段 PID 控制算法提高了 PMSM 的响应时间, 同时超调和稳定度也有较大提升。本仿真系统满足了星上对快速启停控制调整时间小于 60 ms、位置稳定度标准差优于 20 ″ 的性能指标要求。如何对阈值选择进一步优化以改进系统的性能, 将在未来做更深入的研究和探讨。

参考文献

- [1] 郑列华, 尹达一, 冯鑫. 海洋一号卫星水色仪步进电机的角速度振动特性研究 [J]. 红外, 2007, 28(05):15-20.
- [2] 肖湘. 基于 DSP 技术的永磁同步电机控制策略研究 [D]. 华南理工大学, 2014.
- [3] 谭婵. 基于扫描控制的空间凝视成像二维像移补偿技术研究 [D]. 上海: 中科院上海技术物理研究所, 2014.
- [4] 王新平, 李淑英, 黄新栋. 永磁同步电机伺服系统的设计与仿真 [J]. 科学技术与工程, 2009(11):2907-2911.
- [5] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

(上接第 30 页)

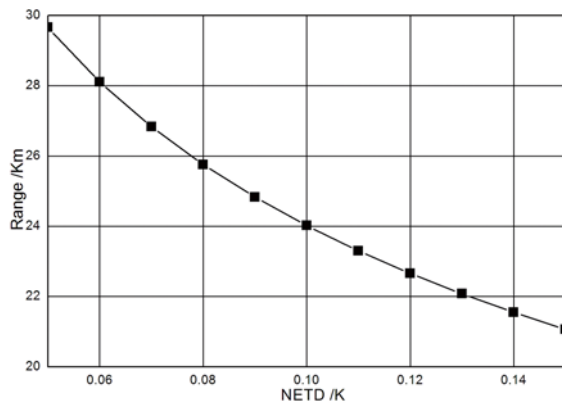


图 3 红外系统作用距离随 NETD 值的变化

7 小结

作用距离是评价红外探测系统的关键性能指标。能否实现对特定辐射目标的有效探测是系统综合能力的体现。由于目前红外探测系统大多采用 IRFPA 作为探测部件, NETD 参数是 IRFPA 的关键参数之一。推导了用 NETD 参数表达的红外探测系统的作用距离方程, 改进了传统红外探测系统存在的不足, 考虑了接收视场中的背景辐射对目标探测的影响和目标成像的弥散效应, 计算了在不同能见度条件下系统

对点源目标的作用距离, 并分析了大气能见度和 NETD 对红外系统作用距离的影响。结果表明, 当能见度增大时, 系统的作用距离就增加; 随着 NETD 参数的变大, 红外系统的探测性能便下降。分析结果能够为红外探测系统的设计、性能指标考核评价提供参考。

参考文献

- [1] 杨宜乐, 岳敏, 周维真. 红外系统 (第 2 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995, 145-147.
- [2] 刘杰, 高雅允. 红外热成像跟踪系统作用距离的评价 [J]. 北京理工大学学报, 1998, 18(1):64-69.
- [3] 王娟, 杨春平, 吴健. 红外热像仪的作用距离估算 [J]. 电光与控制, 2004, 11(13): 17-19.
- [4] 王卫华, 牛照东, 陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2):150-152.
- [5] 王连振, 吴晗平, 李旭辉, 等. 红外成像系统综合评价方法研究 [J]. 红外技术, 2015, 37(1):57-62.
- [6] 小哈得逊. 红外系统原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [7] 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [8] 王莹莹, 张永顺, 何莘. 基于对比度的红外探测系统对巡航导弹作用距离分析 [J]. 电光与控制, 2011, 18(5):19-22.