

文章编号 1004-924X(2018)12-2971-11

精密转台 S 曲线轨迹规划及高精度控制

祁 超, 谢 馨, 陈凌宇, 范世珣, 范大鹏*

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410007)

摘要:为提升精密转台的轨迹运动精度,本文从轨迹规划和运动控制两个方面对传统控制算法进行了改进。轨迹规划方面,推导了 S 曲线轨迹规划方程,并结合转台动力学约束条件给出了轨迹规划参数的取值方法,从而为运动控制算法提供了满足动力学要求的轨迹指令;运动控制方面,在传统双闭环反馈控制基础上增加了 DOB 扰动补偿和前馈补偿,以此改善转台的伺服性能,提升转台的运动精度。在详细说明了轨迹规划算法和运动控制算法的设计过程后,对两部分算法进行综合,给出了具体实现步骤,并以谐波转台和 RV 转台为实验对象进行了多组算法性能测试。实验结果表明:相比于传统控制方法,采用本文提出的方法能够使转台动态精度提升 99.6%,稳态精度提升 99.75%,从而证实了该算法对运动精度提升的有效性。

关键词:精密转台;运动精度;S 曲线轨迹规划;动力学约束;扰动观测器;前馈补偿

中图分类号:TP273.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182612.2971

S-curve trajectory planning and high-precision control of precision servo turntable

QI Chao, XIE Xin, CHEN Ling-yu, FAN Shi-xun, FAN Da-peng*

(College of Mechatronic Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410007, China)

* Corresponding author, E-mail: fdp@nudt.edu.cn

Abstract: Trajectory accuracy is an important performance indicator for precision turntables. To improve the motion accuracy, this study improves the traditional control algorithm from the perspective of trajectory planning and motion control. For trajectory planning, the S-curve trajectory planning equations are deduced, and the trajectory planning parameter values are given in combination with the dynamic constraints of the turntable. This provides the motion control algorithm with trajectory commands that meet the dynamic requirements. For motion control, on the basis of traditional double closed-loop feedback control, DOB disturbance compensation and feedforward compensation are added to improve the servo performance and motion accuracy of the turntable. After describing the design process of the trajectory planning and motion control algorithms in detail, the two algorithms are integrated, and the specific implementation steps are provided. The performance tests of the multiple groups of algorithms are performed using the harmonic turntable and the RV turntable. The experi-

收稿日期:2018-03-12;修订日期:2018-05-04.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2015CB057503)

mental results show that, compared with the traditional control methods, the proposed method can significantly improve the dynamic accuracy of the turntable, thus verifying the effectiveness of the algorithm in improving the motion accuracy.

Key words: precision turntable; motion accuracy; S-curve trajectory planning; dynamic constraints; DOB; feedforward compensation

1 引言

精密转台主要用于测试和标定惯性导航设备,其运动性能直接决定了惯导设备的测量精度。运动控制部件是精密转台实现高性能运动的重要保证,通常由轨迹规划算法和运动控制算法两部分组成。其中轨迹规划算法用于平滑位置指令,使转台运动过程没有柔性冲击;运动控制算法则用于实现转台实际角度对轨迹规划值的跟随。

典型轨迹规划算法包括梯形轨迹规划、S 曲线轨迹规划、三角函数轨迹规划以及高次多项式轨迹规划等,不同轨迹规划算法在指令的平滑效果、过渡时间以及算法复杂程度方面各有不同。S 曲线轨迹规划是一种三次多项式规划算法,不仅具有较好的指令平滑性能,同时还具有结构简单、运算量小、实现方便及运行可靠等诸多优点,因此获得了广泛的研究和应用。

针对 S 曲线轨迹规划算法的研究已有很多。穆海华^[1]等将数控机床刀具 S 曲线点对点运动轨迹规划分成 6 种情况进行讨论,并提供了轨迹规划算法的设计步骤;Kim-Doang Nguyen^[2]根据加加速度曲线的几何对称性推导 S 曲线轨迹规划函数表达式,并将其拓展得到了高次多项式轨迹规划函数的一般求解方法;F Zou^[3]、Keun-Ho Rew^[4]、邓永停^[5]等人从改善系统响应性能的角度提出了加速和减速阶段时间不对称的 S 曲线轨迹规划算法,利用该算法同时能够实现对系统参数的辨识,然而由于引入了较多的运动约束参数,因此算法的分析和求解也更为复杂;另外,通过改进传统 S 曲线轨迹规划算法,以时间、能量、精度等多种性能指标为约束的最优 S 曲线轨迹规划算法也被相继提出^[6-8]。

从上述分析可见,当前对于轨迹规划算法的运动学探究已经比较充分,然而这些研究中大多忽略了轨迹规划参数与被控对象动力学特性的联系,这将导致轨迹规划的输出超过被控对象的驱

动力,显著降低运动精度;此外,传统运动控制算法普遍采用闭环反馈控制,然而闭环控制是一种误差驱动的控制方式,当伺服带宽较低时,实际系统对轨迹规划的跟随精度通常会受到较大影响。为改善跟随精度,王远竹^[9]等在运动控制算法前端引入了前馈补偿环节,并通过仿真说明了经过补偿后的位置响应与轨迹规划结果之间具有良好的动态跟随效果,然而前馈补偿性能与所建立的动力学模型准确性密切相关,对于具有非线性扰动的实际系统,前馈补偿效果仍有待实验验证。

为切实提升精密转台的轨迹控制精度,本文从 S 曲线轨迹规划和运动控制两个方面对传统轨迹控制算法进行改进。在传统 S 曲线轨迹规划算法的基础上,结合转台动力学约束条件,明确了轨迹规划参数的取值方法,从而确保转台始终工作于功率、转矩和转速的非饱和区间内,为实现转台运动的高动态精度提供保证;在运动控制算法方面,提出了一种“DOB+前馈+反馈”的控制策略,有效抑制了转台的非线性扰动,使转台的运动精度获得明显提升。最后,以谐波转台及 RV 转台为被控对象对算法性能进行了充分检验。

2 S 曲线轨迹规划的运动学分析

完整的 S 曲线轨迹规划函数包含加加速段、匀加速段、减加速段、匀减速段、加减速段、匀减速段和减减速段 7 个部分,如图 1 所示。由于各段加加速度(jerk)均为常值,因此只需确定每段转折时间 $t_1 \sim t_7$,即可通过加加速度对时间的二次积分求得轨迹规划曲线。

在不同的位移、速度、加速度、加加速度约束条件下,轨迹规划函数可能不包含匀加速段(I、V)、匀减速段(III、VII)或者匀减速段(IV),但考虑到轨迹曲线的几何对称性,因此轨迹规划可分为 4 种情形,不同情形下的加速度曲线如图 2 所示。

为便于表示上述情形所对应的运动约束条

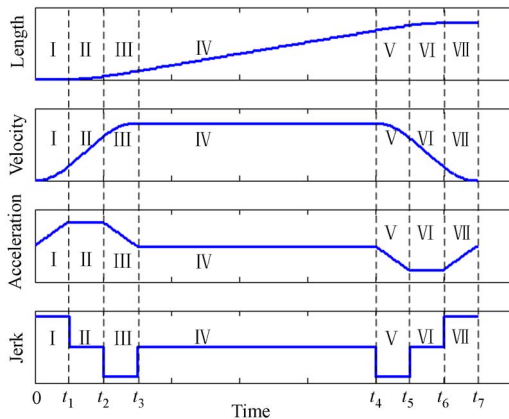


图 1 典型 S 曲线轨迹规划的位移、速度、加速度及加加速度函数

Fig. 1 Displacement, velocity, acceleration and jerk of typical S-curve trajectory scheduling function

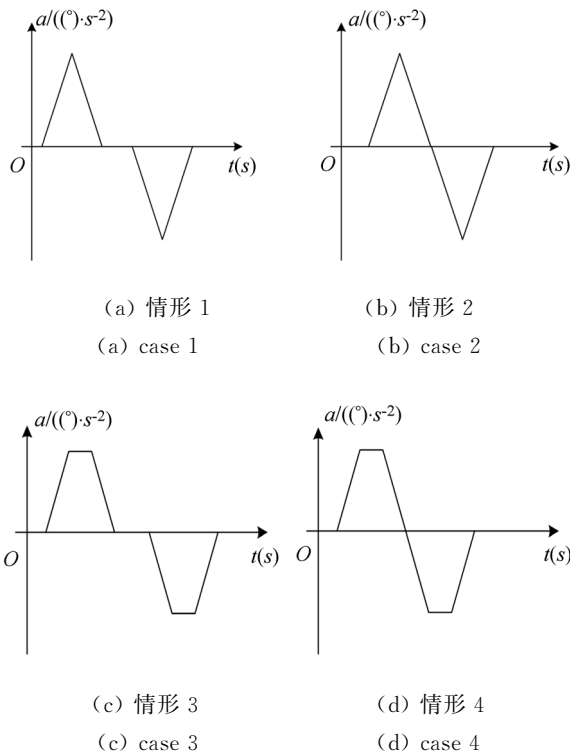


图 2 S 曲线轨迹给定加速度曲线的四种情形
Fig. 2 Four acceleration cases of S-curve trajectory planning algorithm

件,令轨迹规划算法中设置的最大速度约束值为 v_{max} ,最大加速度约束为 a_{max} ,最大加加速度为 j_{max} ,运动路程为 S_i ;然后进行如下定义^[1]:当规划算法的加速度达到最大值 a_{max} ,且在最短时间内将加速度和速度恢复到 0 时的规划路程定义为

s_a_lim ,将最大速度值定义为 v_a_lim ;当规划给定的速度达到最大值 v_{max} 时,且在最短时间内将速度恢复到 0 时的规划路程定义为 s_v_lim ,则容易解得:

$$s_a_lim = \frac{2a_{max}^3}{j_{max}^2},$$

$$v_a_lim = \frac{a_{max}^2}{j_{max}},$$

$$s_v_lim = (1 + \text{sign}(a_{max} - \sqrt{v_{max} j_{max}})) v_{max} \sqrt{\frac{v_{max}}{j_{max}}} + (1 - \text{sign}(a_{max} - \sqrt{v_{max} j_{max}})) v_{max} \frac{v_{max} j_{max} + a_{max}^2}{2 a_{max} j_{max}}. \quad (1)$$

因此,4 种轨迹规划情形下的运动约束条件及对应的转折时间 $t_1 \sim t_7$ 存在如下结论^[1]:

情形 1 所对应的运动学约束条件为:

$$\begin{cases} s_v_lim < S_i < s_a_lim \\ v_{max} < v_a_lim \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} S_i > s_a_lim \\ v_{max} < v_a_lim \end{cases}, \text{ 此时}$$

$$\text{有 } t_1 = t_2 = \sqrt{\frac{v_{max}}{j_{max}}}, t_4 = \frac{S_i}{v_{max}};$$

情形 2 对应的运动学约束条件为:

$$\begin{cases} S_i < s_a_lim \\ v_{max} > v_a_lim \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} S_i < \min(s_v_lim, s_a_lim) \\ v_{max} < v_a_lim \end{cases},$$

$$\text{此时有 } t_1 = t_2 = \sqrt[3]{\frac{S_i}{2j_{max}}}, t_4 = 2t_2;$$

情形 3 对应的运动学约束条件为:

$$\begin{cases} s_a_lim < S_i < s_v_lim \\ v_{max} > v_a_lim \end{cases}, \text{ 此时 } t_1 = \frac{a_{max}}{j_{max}}, t_2 = \sqrt{(\frac{a_{max}}{2j_{max}})^2 + \frac{S_i}{a_{max}} - \frac{a_{max}}{2j_{max}}}, t_4 = \sqrt{(\frac{a_{max}}{2j_{max}})^2 + \frac{S_i}{a_{max}}} + \frac{a_{max}}{2j_{max}};$$

情形 4 对应的运动学约束条件为:

$$\begin{cases} S_i > \max(s_a_lim, s_v_lim) \\ v_{max} > v_a_lim \end{cases}, \text{ 此时 } t_1 = \frac{a_{max}}{j_{max}}, t_2 = \frac{v_{max}}{a_{max}}, t_4 = \frac{S_i}{v_{max}}.$$

根据所求的 t_1, t_2 和 t_4 ,再结合加速度曲线几何对称性,可得其余各转折时间: $t_3 = t_1 + t_2, t_5 = t_4 + t_1, t_6 = t_4 + t_2, t_7 = t_4 + t_3$ 。至此完成了 S 曲线轨迹规划的运动学分类讨论。若以 S_n, V_n 和 $A_n (n=1 \sim 7)$ 分别表示 $t_1 \sim t_7$ 时刻的位置、速度和加速度值,则 S 曲线轨迹规划函数可以表示为:

$$s(t) = \begin{cases} \frac{1}{6} j_{\max} t^3, & 0 < t \leq t_1 \\ S_1 + V_1(t - t_1) + \frac{1}{2} A_1(t - t_1)^2, & t_1 < t \leq t_2 \\ S_2 + V_2(t - t_2) + \frac{1}{2} A_1(t - t_2)^2 - \frac{1}{6} j_{\max}(t - t_2)^3, & t_2 < t \leq t_3 \\ S_3 + V_3(t - t_3), & t_3 < t \leq t_4 \\ S_4 + V_4(t - t_4) - \frac{1}{6} j_{\max}(t - t_4)^3, & t_4 < t \leq t_5 \\ S_5 + V_5(t - t_5) + \frac{1}{2} A_5(t - t_5)^2, & t_5 < t \leq t_6 \\ S_6 + V_6(t - t_6) + \frac{1}{2} A_6(t - t_6)^2 + \frac{1}{6} j_{\max}(t - t_6)^3, & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,运动参数 j_{\max}, A_n, V_n, S_n 与时间参数 $t_n(n=1\sim 7)$ 完整刻画了 S 曲线轨迹规划函数。上述参数的取值与转台动力学特性密切相关,因此有必要结合转台动力学约束条件,进一步明确 S 曲线轨迹规划参数的取值方法。

3 S 曲线轨迹规划参数的取值

S 曲线轨迹规划算法是从运动学角度进行设计的,这意味着对于任意设置的运动约束 $j_{\max}, a_{\max}, v_{\max}$ 和 S_t ,通过该算法均能解出一组轨迹规划参数 A_n, V_n, S_n 以及 t_n ,从而得到满足运动约束条件的轨迹规划函数。然而伺服转台的动力学约束条件,如转速约束、转矩约束及功率约束,则是由其结构参数和电气参数决定的,如果轨迹规划参数与转台动力学约束条件不匹配,会造成响应曲线变形,严重影响运动性能^[10]。

图 3 所示即为轨迹规划速度 V_3 超出电机最大转速时的运动响应曲线。从图 3 可见,在接近电机最大转速的升速与降速时刻,实际速度曲线转折很快,柔性冲击明显;同时,由于实际速度响应无法完全跟随轨迹规划速度,轨迹和速度响应均出现了明显的动态跟随误差,这在要求精密运动的应用场合是不允许出现的。为此,本节提出了一种基于动力学约束条件的 S 曲线轨迹规划参数取值方法。首先,基于转台动力学模型分析了速度与加速度的动力学约束条件;然后,由 S 曲线轨迹规划表达式推导出轨迹规划速度与加速度的

映射关系;最后,通过对轨迹规划的相平面曲线进行几何特征分析,给出了满足动力学约束条件的 S 曲线轨迹规划参数取值方法。

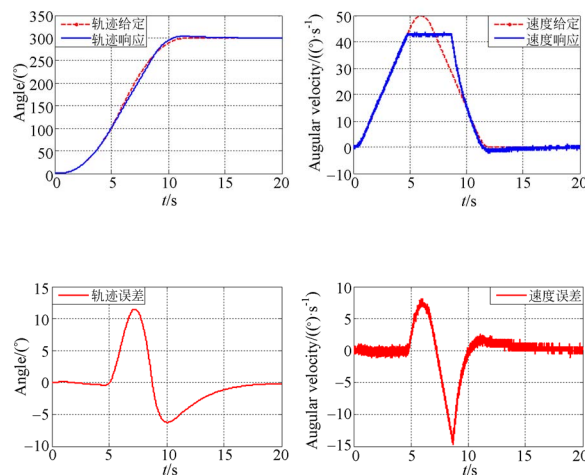


图 3 轨迹规划速度超出电机最大转速时的实测曲线
Fig. 3 Actual curves when speed planned exceeds the maximum speed

3.1 伺服转台工作的动力学约束条件

设转台转速为 v ,加速度为 a ,转动惯量为 J ,粘滞摩擦系数为 B ,电机输出转矩为 T ,输出功率为 P ,负载转矩 T_l ,最大输出转矩为 T_{\max} ,最大输出功率为 P_{\max} ,最高转速为 V_{\max} 。则根据牛顿第二定律可得伺服转台的动力学方程:

$$\begin{cases} T - T_l - Bv = Ja \\ P = Tv \end{cases} \quad (3)$$

根据转矩约束、功率约束和转速约束条件,即:

$$|T| \leq T_{\max}, |P| \leq P_{\max}, |v| \leq V_{\max} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)中,可得关于伺服转台速度 v 和加速度 a 的动力学约束方程组:

$$\begin{cases} -T_{\max} \leq T_l + Bv + Ja \leq T_{\max} \\ -V_{\max} \leq v \leq V_{\max} \\ -P_{\max} \leq (T_l + Bv + Ja)v \leq P_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)确定了转台速度 v 及加速度 a 的动力学可行域,从而为 S 曲线轨迹规划参数取值提供依据。

3.2 基于动力学约束的轨迹规划参数取值

为了得到满足动力学约束条件的轨迹规划运动参数,需要建立起转台实际速度 v 与加速度 a

的函数关系。当伺服转台具有足够小的动态跟踪误差时,可以用轨迹规划速度和加速度来近似表示实际运动响应。因此,根据式(2)可得全时段上(0 < t ≤ t_f)转台实际速度 v 和加速度 a 的映射关系:

$$\begin{cases} v = \frac{a^2}{2j_{\max}} & , 0 < t \leq t_1 \\ a = A_1 & , t_1 < t \leq t_2 \\ v = V_2 + \frac{A_1}{j_{\max}}(A_1 - a) - \frac{1}{2j_{\max}}(A_1 - a)^2 & , t_2 < t \leq t_3 \\ v = V_3 & , t_3 < t \leq t_4 \\ v = V_3 - \frac{a^2}{2j_{\max}} & , t_4 < t \leq t_5 \\ a = -A_1 & , t_5 < t \leq t_6 \\ v = V_1 - \frac{A_1}{j_{\max}}(A_1 + a) + \frac{1}{2j_{\max}}(A_1 + a)^2 & , t_6 \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (6)$$

理论上只需将式(6)代入式(5)中,即可得到满足动力学约束条件的参数取值范围,但考虑到待求解的方程数量多、阶次高,为简化解算过程,将动力学约束条件(5)和轨迹规划方程(6)分别表示于横轴为速度 v、纵轴为加速度 a 的相平面中,如图 4 所示。从图 4 中可见,四条直线和四条曲线界定了动力学约束区域,轨迹规划函数以红色实线表示。显然,只有当轨迹规划函数完全处于动力学约束区域内,才能实现轨迹响应对轨迹规划指令的良好跟随。

根据式(6)可知,轨迹规划相平面曲线的左右两端为抛物段,其对称轴均为横轴,抛物段与横轴交点分别为(0, 0)和(V₃, 0);对于不存在匀加速段和匀减速段的情形 1、情形 2,两条抛物段相交于(±V₃/2, A₁);而对于具有匀加速段和匀减速段的情形 3、情形 4,相平面曲线在左右抛物段之间相应上下两条水平线段 a = ±A₁。因此,综合轨迹规划四种情形可知,以(V₃, A₁)和(0, -A₁)为对角点的矩形区域能够覆盖整条轨迹规划相平面曲线,故只要使矩形角点(V₃, A₁)和(V₃, -A₁)同时处于动力学约束区间内,便可以保证整条轨迹规划曲线满足动力学约束要求。基于上述分析,结合式(5)完成轨迹规划参数的动力学取值,取值的原理如图 5 所示。

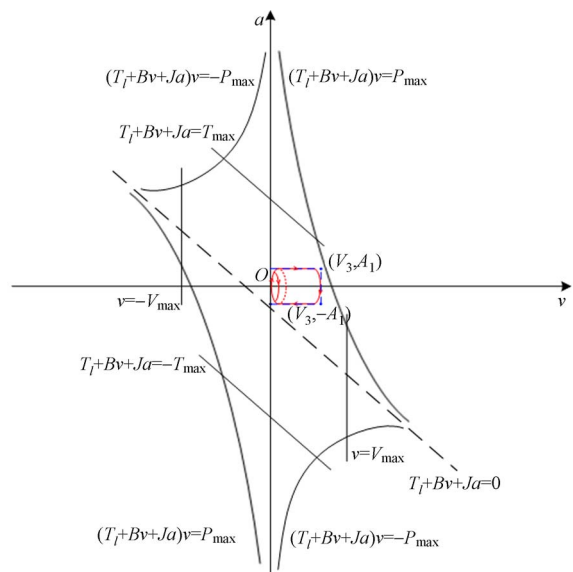


图 4 转台动力学约束条件与轨迹规划函数的相平面表示

Fig. 4 Phase plane representation of dynamic constraint region and trajectory planning curve of servo turntable

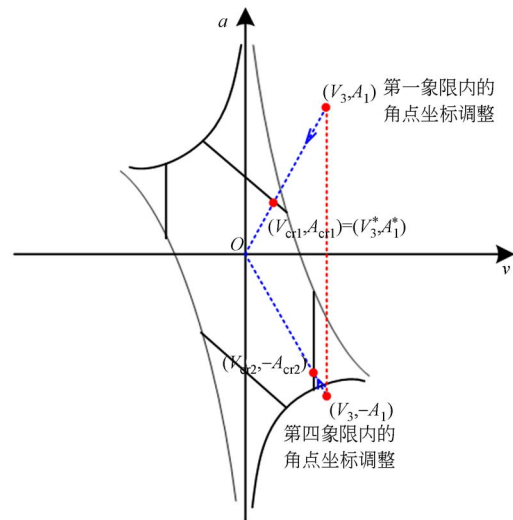


图 5 基于动力学约束的轨迹规划参数取值原理

Fig. 5 Principle diagram of dynamic correction of S-curve trajectory planning curve

首先根据式(1)和式(2)得到:

$$V_3 = \frac{S_t}{t_4}, A_1 = \frac{V_3}{t_2} \quad (7)$$

由此可得矩形在第一象限的角点坐标(V₃, A₁)和第四象限的角点坐标(V₃, -A₁)。再由式(5)提供的边界条件,分别求得第一、四象限内的速度和加速度临界值 V_{cr1}, V_{cr2}, A_{cr1} 和 A_{cr2}。

$$\begin{cases} V_{\sigma 1} = \frac{V_3}{2(BV_3 + JA_1)} \left[\min \left[2T_{\max} - T_l, \sqrt{T_l^2 + 4P_{\max} \left(B + \frac{JA_1}{V_3} \right)} \right] - T_l \right] \\ V_{\sigma 2} = \min \left[\frac{(T_{\max} + T_l)V_3}{JA_1 - BV_3}, u_{\max}, \frac{V_3 + \sqrt{V_3^2 + 4(JA_1 - BV_3)V_3 P_{\max}}}{(1 + \text{sign}(JA_1 - BV_3)) \cdot (JA_1 - BV_3)} \right] \\ A_{\sigma 1} = \frac{A_1}{V_3} V_{\sigma 1} \\ A_{\sigma 2} = -\frac{A_1}{V_3} V_{\sigma 2} \end{cases} \quad (8)$$

将 A_1 和 $A_{\sigma 1}$, V_3 和 $V_{\sigma 1}$ 分别进行对比, 如果 A_1 大于 $A_{\sigma 1}$, 或者 V_3 大于 $V_{\sigma 1}$, 则说明角点 (V_3 , A_1) 不在动力学约束区间内, 此时应当对其进行调整, 否则保留原值不变; 同理, 在第四象限内对比 $-A_1$ 和 $-A_{\sigma 2}$, V_3 和 $V_{\sigma 2}$, 如果前者大于后者, 则应当调整运动参数, 否则保留原值。为使轨迹规划曲线在全时段上均满足动力学约束条件, 将

第一和第四象限的对比结果进行综合, 得到轨迹规划速度与加速度参数的取值结果:

$$\begin{cases} A_1^* = \min(A_{\sigma 1}, -A_{\sigma 2}, A_1) \\ V_3^* = \min(V_{\sigma 1}, V_{\sigma 2}, V_3) \end{cases} \quad (9)$$

然后根据 V_3^* 和 A_1^* 重新计算运动参数 $A_i^* \sim A_7^*$, $V_1^* \sim V_7^*$, $S_1^* \sim S_7^*$ 以及时间参数 $t_1^* \sim t_7^*$, 可得:

$$\begin{cases} A_1^* = A_2^* = -A_5^* = -A_6^* = \min \left\{ A_1, \frac{A_1}{2(BV_3 + JA_1)} \left[\min \left[2T_{\max} - T_l, \sqrt{T_l^2 + 4P_{\max} \left(B + \frac{JA_1}{V_3} \right)} \right] - T_l \right], \right. \\ \left. \min \left[\frac{A_1(T_{\max} + T_l)}{(JA_1 - BV_3)}, \frac{A_1 u_{\max}}{V_3}, \frac{A_1(V_3 + \sqrt{V_3^2 + 4(JA_1 - BV_3)V_3 P_{\max}})}{V_3(JA_1 - BV_3)(1 + \text{sign}(JA_1 - BV_3))} \right] \right\} \\ A_3^* = A_4^* = A_7^* = 0 \\ V_1^* = V_6^* = \frac{A_1^{*2}}{2j_{\max}} \\ V_3^* = V_4^* = \min \left\{ V_3, \frac{V_3}{2(BV_3 + JA_1)} \left[\min \left[2T_{\max} - T_l, \sqrt{T_l^2 + 4P_{\max} \left(B + \frac{JA_1}{V_3} \right)} \right] - T_l \right], \right. \\ \left. \min \left[\frac{(T_{\max} + T_l)V_3}{JA_1 - BV_3}, u_{\max}, \frac{V_3 + \sqrt{V_3^2 + 4(JA_1 - BV_3)V_3 P_{\max}}}{(JA_1 - BV_3)(1 + \text{sign}(JA_1 - BV_3))} \right] \right\} \\ V_2^* = V_5^* = V_3^* - \frac{A_1^{*2}}{2j_{\max}}, V_7^* = 0 \\ t_1^* = \frac{A_1^*}{j_{\max}}, t_2^* = \frac{V_3^*}{A_1^*}, t_3^* = \frac{A_1^{*2} + j_{\max} V_3^*}{j_{\max} A_1^*}, t_4^* = \frac{S_l}{V_3^*} \\ t_5^* = t_4^* + t_1^*, t_6^* = t_4^* + t_2^*, t_7^* = t_4^* + t_3^* \\ S_1^* = \frac{A_1^{*3}}{6j_{\max}^2}, S_2^* = \frac{3j_{\max}^2 V_3^{*2} + A_1^{*4} - 3A_1^{*2} j_{\max} V_3^*}{6j_{\max}^2 A_1^*} \\ S_3^* = S_2^* + V_2^* t_1^* + \frac{1}{2} A_2^* t_1^{*2} - \frac{1}{6} j_{\max} t_1^{*3}, S_4^* = S_3^* + \frac{j_{\max} A_1^* S_l - A_1^{*2} V_3^* - j_{\max} V_3^{*2}}{j_{\max} A_1^*} \\ S_5^* = S_4^* + V_4^* t_1^* - \frac{1}{6} j_{\max} t_1^{*3}, S_6^* = S_5^* + V_5^* (t_6^* - t_5^*) + \frac{1}{2} A_5^* (t_6^* - t_5^*)^2 \\ S_7^* = S_l \end{cases} \quad (10)$$

式(10)给出了 S 曲线轨迹规划的运动参数和时间参数, 基于该公式的 S 曲线轨迹规划函数在满

足运动学约束条件的同时, 也必定满足转台动力学约束条件, 从而为转台的高精度控制提供了保证。

4 高精度轨迹控制方法

闭环控制是误差驱动的控制方式,因此在转台运动过程中,S 曲线轨迹规划结果与实际角度响应之间必然存在一定偏差,从而导致转台的动态精度下降。为提升伺服转台的运动精度,本文提出了一种“DOB+反馈+前馈”的复合控制策略,其中 DOB 为扰动观测器,用于补偿转台非线性扰动;反馈环节采用比例控制或比例-积分控制,用以保证稳态精度;前馈环节则用于提升转台运动的动态精度。

4.1 扰动补偿环节

DOB 扰动补偿环节的工作原理如图 6 所示^[11]。图中 G_{uv} 为伺服转台开环传递函数,可近似为一阶惯性环节 $G_{uv} = \frac{K}{s+p}$; Q 为二阶低通滤波器,可表示为 $Q = \frac{4\pi^2 f_c^2}{s^2 + 4\xi\pi f_c s + 4\pi^2 f_c^2}$,其中 ξ 为阻尼系数, f_c 为滤波器截止频率。

根据转台开环控制电压 u 和实际转速 v ,得到扰动估计量:

$$\hat{d} = Q(G_{uv}^{-1}v - u). \quad (11)$$

在对转台非线性扰动 d 进行补偿后,转台会在更宽频带上表现出线性特性,从而为反馈和前馈环节的设计提供良好的动力学条件。

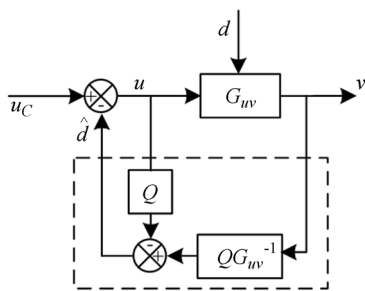


图 6 DOB 扰动补偿环节结构框图

Fig. 6 Block diagram of DOB principle for disturbance compensation

4.2 反馈控制环节

反馈控制环节为“速度闭环+位置闭环”的双回路控制结构,如图 7 所示。其中,速度环采用比例+积分控制,位置环采用比例控制。

设位置闭环输入指令为 s_{clin} ,位置响应为 s_{act} ;

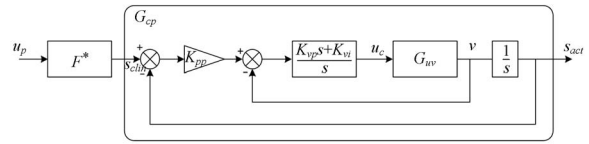


图 7 反馈控制环节 G_{cp} 结构框图

Fig. 7 Block diagram of position closed loop feedback control

速度环比例系数为 K_{vp} ,积分系数 K_{vi} ;位置环比例系数为 K_{pp} ,容易求得位置闭环传递函数 G_{cp} 为:

$$G_{cp} = \frac{S_{act}(s)}{S_{clin}(s)} = \frac{KK_{pp}(K_{vp}s + K_{vi})}{s^3 + (p + KK_{vp})s^2 + K(K_{vi} + K_{pp}K_{vp})s + KK_{pp}K_{vi}} \quad (12)$$

4.3 前馈补偿环节

前馈补偿环节处于位置闭环前端,其输入为 S 曲线轨迹规划值 $s(t)$,输出为位置闭环指令 s_{clin} 。为实现位置响应 s_{act} 对轨迹规划函数 $s(t)$ 的高精度跟随,理想前馈环节 F 应当为^[12]:

$$F = G_{cp}^{-1} = \frac{s^3 + (p + KK_{vp})s^2 + K(K_{vi} + K_{pp}K_{vp})s + KK_{pp}K_{vi}}{KK_{pp}(K_{vp}s + K_{vi})} \quad (13)$$

虽然在式(13)中前馈传递函数 F 的零点多于极点,但考虑到前馈环节输入信号,即 S 曲线轨迹规划函数 $s(t)$ 具有三阶可导的特殊性质,并且有 $sS(s) = V(s)$, $s^2S(s) = A(s)$, $s^3S(s) = J(s)$,因此结合 S 曲线轨迹规划指令 $S(s)$,可将式(13)表示为:

$$F^* = S(s) \cdot F = \frac{J(s) + aA(s) + bV(s) + cS(s)}{d \cdot s + e}, \quad (14)$$

其中: $a = p + KK_{vp}$, $b = K(K_{vi} + K_{pp}K_{vp})$, $c = KK_{pp}K_{vi}$, $d = KK_{pp}K_{vp}$, $e = KK_{pp}K_{vi}$ 。

前馈补偿环节 F^* 的原理框图如图 8 所示。

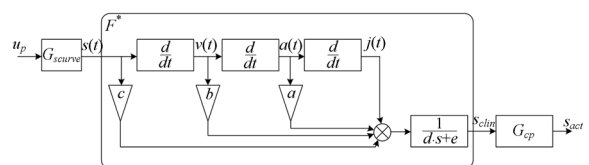


图 8 S 曲线轨迹规划算法的前馈补偿环节 F^* 结构框图

Fig. 8 Block diagram of feedforward compensation with S-curve trajectory planning

其中, u_p 为原始位置指令, G_{curve} 表示 S 曲线轨迹规划算法。当轨迹规划指令 $s(t)$ 经前馈环节 F^* 补偿后, 即可输入位置闭环 G_{cp} 中, 从而实现位置响应 s_{act} 对 $s(t)$ 的高精度跟随。

5 S 曲线轨迹规划及高精度控制算法的实现

转台 S 曲线轨迹规划算法与高精度运动控制算法的逻辑结构如图 9 所示。考虑到算法需要在

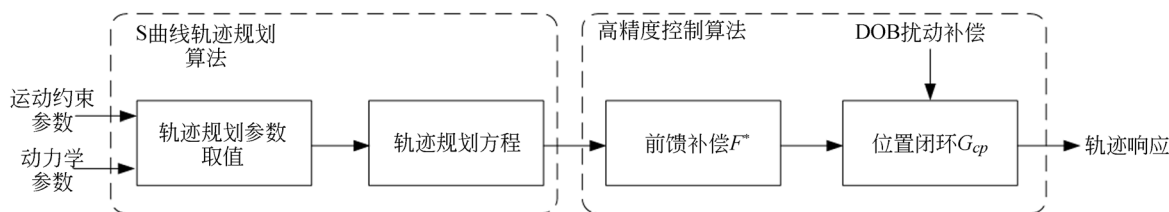


图 9 转台 S 曲线轨迹规划及高精度控制算法的逻辑结构框图

Fig. 9 Block diagram of high dynamic precise S-curve trajectory planning algorithm

根据式(1)得到 s_a_lim , s_v_lim , v_a_lim , 并结合运动约束参数 j_{max} , a_{max} , v_{max} 进行轨迹规划情形判断, 得到轨迹规划时间 t_1 , t_2 及 t_4 。

根据式(2)计算出各阶段的时刻 $t_1 \sim t_7$, 对应的加加速度 $J_1 \sim J_7$, 加速度 $A_1 \sim A_7$, 速度 $V_1 \sim V_7$ 和位移 $S_1 \sim S_7$; 再由式(10)解得满足动力学约束条件的轨迹规划参数 S_n^* , V_n^* , A_n^* 以及 t_n^* 。

步骤 3: 轨迹规划迭代计算

设伺服中断周期为 T_s , 则根据迭代次数 k 可得当前时刻 $t = kT_s$ 。然后根据步骤 2 求得的轨迹规划参数, 判断轨迹规划当前阶段 n , 并进一步得到 t 时刻所对应的运动规划值:

$$\begin{aligned} j_k &= J_n \\ a_k &= A_n^* + J_n(kT_s - t_n^*) \\ v_k &= V_n^* + A_n^*(kT_s - t_n^*) + \frac{1}{2} J_n(kT_s - t_n^*)^2 \\ s_k &= S_n^* + V_n^*(kT_s - t_n^*) + \frac{1}{2} A_n^*(kT_s - t_n^*)^2 + \\ &\quad \frac{1}{6} J_n(kT_s - t_n^*)^3 \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $n=1 \sim 7$, j_k , a_k , v_k , s_k 分别表示第 k 次迭代时的加加速度、加速度、速度和轨迹规划值。

离散条件下进行, 为此本节分别给出 S 曲线轨迹规划算法和高精度控制算法的离散实现步骤。

5.1 S 曲线轨迹规划算法的实现

步骤 1: S 曲线轨迹规划算法赋初值

(1) 将算法中参与迭代的变量清零, 即有 j_0 , a_0 , v_0 , s_0 , $k=0$; (2) 运动约束参数 j_{max} , a_{max} , v_{max} 由用户直接赋值; (3) 转台动力学参数 J , B , T_l 通过实验辨识得到; (4) 转台最大输出功率 P_{max} 、堵转力矩 T_{max} 以及最大转速 V_{max} 通过查阅相关手册获取。

步骤 2: 基于动力学约束条件确定轨迹规划参数

步骤 4: 停机条件判断

将运行时间 t 与 t_7 进行对比, 如果 $t < t_7$, 则迭代尚未完成, 此时更新运动参数 j_k , a_k , v_k , s_k 以及计数变量 k , 并返回步骤 3 进行下一次迭代运算; 而当 t 超过 t_7 时, 则算法迭代完毕, $j_k = a_k = v_k = 0$; $s_k = S_t$, 此时算法处于停机等待状态, 直至目标位置 S_t 发生改变时, 再从步骤 2 重新开始运行。

5.2 高精度控制算法的实现

步骤 1: 变量赋初值

控制算法按照迭代方式计算输出, 因此需要对扰动补偿量 d_k 、前馈补偿量 f_k^* 和反馈控制量 u_k 赋初值, 即令 $k=d_0=f_0^*=u_0=0$ 。

步骤 2: 扰动补偿量计算

根据式(11)对扰动观测算法进行双线性变换, 得到扰动观测量 d_k :

$$\begin{aligned} d_k &= \frac{\pi^2 f_c^2 T_s}{K(\pi^2 f_c^2 T_s^2 + 2\xi\pi f_c T_s + 1)} \cdot [(pT_s + 2)v_k + \\ &\quad 2pT_s v_{k-1} + (pT_s - 2)v_{k-2} - KT_s(u_k + 2u_{k-1} + u_{k-2}) - \\ &\quad \frac{2(\pi^2 f_c^2 T_s^2 - 1)d_{k-1} + (\pi^2 f_c^2 T_s^2 - 2\xi\pi f_c T_s + 1)d_{k-2}}{\pi^2 f_c^2 T_s}]. \end{aligned} \quad (16)$$

步骤 3:前馈补偿量计算

将前馈函数式(14)进行离散化可得:

$$f_k^* = \frac{T_s(j_k + j_{k-1} + aa_k + aa_{k-1} + bv_k + bv_{k-1} + cs_k + cs_{k-1})}{T_s e + 2d} - \frac{T_s e - 2d}{T_s e + 2d} f_{k-1}^* \quad (17)$$

步骤 4:反馈控制量计算

对反馈函数式(12)进行离散化,可得:

$$u_k = u_{k-1} + \frac{(2K_{vp} + K_{vi} T_s)(K_{pp} f_k^* - K_{pp} p_k - v_k)}{2} + \frac{(-2K_{vp} + K_{vi} T_s)(K_{pp} f_{k-1}^* - K_{pp} p_{k-1} - v_{k-1})}{2} \quad (18)$$

步骤 5:补偿量求和

将步骤 3 和步骤 4 中求得的反馈及前馈补偿量相加得到转台的运动控制量 u_k^c , 即有:

$$u_k^c = u_k + d_k \quad (19)$$

随后使变量 k 自加 1, 并在下一个伺服周期返回步骤 2, 进行迭代计算。

6 实验验证

为验证本文提出的算法对伺服转台运动精度的提升效果, 分别以谐波传动伺服转台和 RV 传动伺服转台为实验对象, 通过 dSPACE 半实物仿真平台进行轨迹规划算法和运动控制算法的设计与控制性能分析。实验平台如图 10 所示。

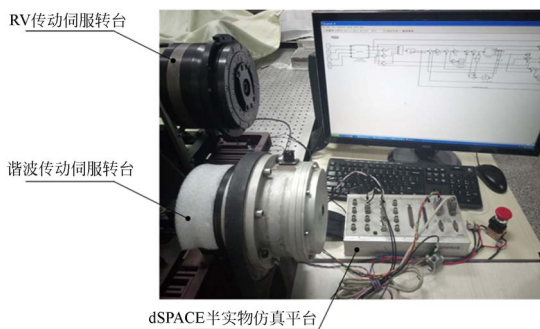


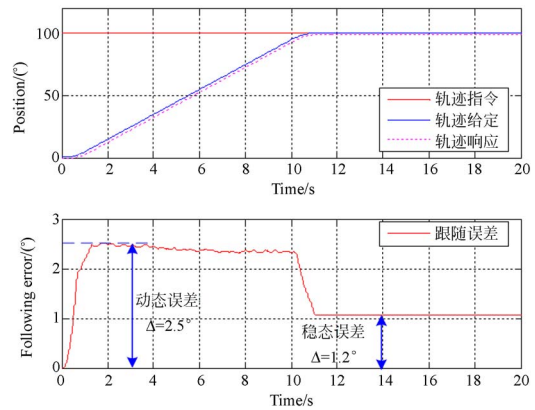
图 10 算法性能测试实验台

Fig. 10 Experimental turntable for testing algorithm performance

其中,谐波传动伺服平台采用中技克美公司的 XBS80-100 谐波减速器,其减速比为 80;驱动电机为永磁直流力矩电机,型号为 12CDT-003,额定功率为 150 W,堵转力矩为 3.5 N·m;为了

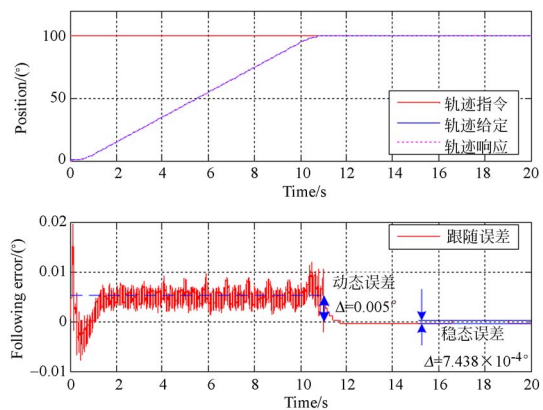
检测电机转角,在电机端安装有 25 000 线的单圈增量编码器,并进行 40 细分。RV 传动伺服平台选用南通振康 RV-201 减速器,其减速比为 161;该平台采用无刷直流电机驱动,电机型号 80BL110S50430,额定功率为 500 W,堵转力矩为 1.6 N·m;增量编码器安装于电机轴端,其测角分辨率为 $3.6 \times 10^{-4}^\circ$ 。

以上述谐波转台和 RV 转台为对象开展了多组运动控制性能对比实验,采用 dSPACE 采集原始轨迹指令、轨迹规划输出、编码器数据等多种信号,并利用 Matlab 进行数据处理,得到具有代表性的典型实验曲线如图 11 和图 12 所示。



(a) 双闭环控制方法

(a) Traditional control method



(b) “DOB+前馈+反馈”控制方法

(b) “DOB+feedforward+feedback” method

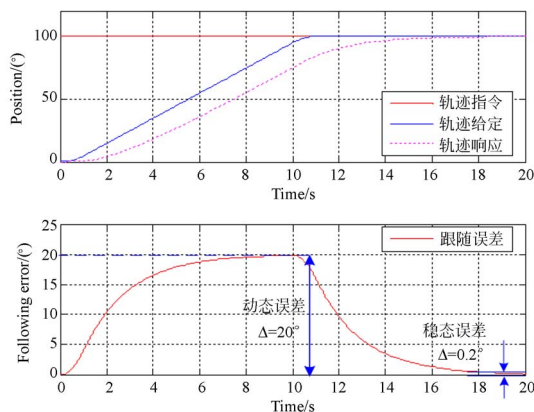
图 11 谐波转台采用不同控制方法时的实验曲线

Fig. 11 Experimental curves of harmonic servo turntable using different control methods

图 11(a)和 11(b)分别是谐波转台采用“位置环 P 控制+速度环 PI 控制”的传统双闭环运动控

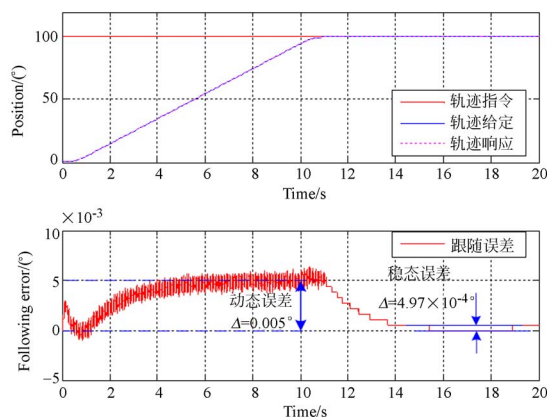
制算法和采用本文提出的“DOB+前馈补偿+双闭环反馈”控制算法的典型实验曲线,所设置的轨迹规划运动约束条件为: $S_t = 100^\circ$, $v_{t_{max}} = 10 (\circ)/s$, $a_{t_{max}} = 10 (\circ)/s^2$, $j_{t_{max}} = 100 (\circ)/s^3$ 。从图 11(a)可见,在未进行扰动补偿和前馈补偿时,谐波转台的轨迹响应存在较为明显的跟随误差,其最大动态误差为 2.5° ,最大稳态误差为 1.2° ;在引入 DOB 和前馈环节后,由于有效补偿了非线性扰动,并提升了伺服带宽,其最大动态误差减小到 0.01° ,动态精度提升 99.6%;最大稳态误差为 7.438×10^{-4} ,稳态精度提升 99.94%。

图 12 是 RV 转台采用传统控制方法与“DOB+前馈补偿+双闭环反馈”控制方法得到的典型实验曲线,所设置的轨迹规划运动约束参数与谐波转台保持一致。从图 12 可见,在没有进行前馈和 DOB 补偿时,RV 转台的动态误差最大值为 20° ,稳态误差最大值为 0.2° ;而采用前馈和 DOB 补偿后,动态误差最大值仅为 0.005° ,动态精度提升 99.975%;同时,最大稳态误差为 4.97×10^{-4} ,稳态精度提升 99.75%。



(a) 双闭环控制方法

(a) Traditional control method



(b) “DOB+前馈+反馈”控制方法

(b) “DOB+feedforward+feedback” method

图 12 RV 转台采用不同控制方法时的实验曲线

Fig. 12 Experimental curves of RV servo turntable using different control methods

综合两种转台的对比结果可知,经 DOB 和前馈补偿后,转台的动态精度及稳态精度均获得了明显提升。

7 结 论

为改善伺服转台运动精度,本文从 S 曲线轨迹规划和高精度运动控制两个方面对传统控制方法进行了改进。首先,针对不同运动约束情形,推导了 S 曲线轨迹规划表达式,并结合精密转台动力学约束条件,给出了 S 曲线轨迹规划参数的确定方法;然后,提出了一种“DOB+前馈+反馈”的高精度运动控制算法,并通过多组实验进行了性能检验。实验结果表明:相比传统控制算法,“DOB+前馈+反馈”的控制策略能够使转台动态精度提升 99.6%,稳态精度提升 99.75%,显著改善了转台运动精度,从而为精密转台高精度运动控制提供了一种行之有效的思路。

参考文献:

- [1] 穆海华,周云飞,严思杰,等.超精密点对点运动三阶轨迹规划精度控制[J].机械工程学报,2008,44(1):126-132.
MU H H, ZHOU Y F, YAN S J, et al. Precision control of third-order profile planning for high accuracy point-to-point motion system[J]. Chinese Jour-

nal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 126-132. (in Chinese)

- [2] NGUYEN K D, NG T C, CHEN I. On algorithms for planning S-curve motion profiles[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2008, 5(1): 99-106.
- [3] ZOU F, QU D, XU F. Asymmetric s-curve trajectory planning for robot point-to-point motion[C]. IEEE

- International Conference on Robotics & Biomimetics, Guilin, P. R. China*, 2009:2172-2176.
- [4] REW K H, KIM K S. Using asymmetric S-curve profile for fast and vibrationless motion[C]. *International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea*, 2007, 12(10):500-504.
- [5] 邓永停,李洪文,刘京,等.基于扰动力矩观测器的大口径望远镜低速控制[J].*光学精密工程*, 2017, 25(10):2636-2644.
DENG Y T, LI H W, LIU J, et al.. Low-speed control of large telescope based on disturbance torque observer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10):2636-2644. (in Chinese)
- [6] 杨锦涛,姜文刚,林永才.工业机器人冲击最优的轨迹规划算法[J].*科学技术与工程*, 2014, 14(28):64-69.
YANG J T, JIANG W G, LIN Y C. Jerk-optimal trajectory planning algorithm of industry robot[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(28):64-69. (in Chinese)
- [7] MECKL P H, SEERING W P. Minimizing residual vibration for point-to-point motion[J]. *Journal of Vibration & Acoustics*, 1985, 107(4):378-382.
- [8] 陈忠泽,颜国正,林良明,等.一种新的机械手最优轨迹的规划算法[J].*光学精密工程*, 2001, 9(3):242-246.
CHEN ZH Z, YAN G ZH, LIN L M, et al.. Novel approach to generating optimal smooth trajectory for a manipulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3):242-246. (in Chinese)
- [9] 王远竹,胡金高.伺服高速轨迹规划与精密跟踪控制的研究[J].*微电机*, 2017(11):35-38.
WANG Y ZH, HU J G. Research on servo high speed trajectory planning and precision tracking control[J]. *Micromotors*, 2017, 50(11):35-38. (in Chinese)
- [10] 郝仁剑,王军政,李静,等.基于功率及转矩约束的大惯量伺服系统速度规划[J].*机械工程学报*, 2014, 50(3):206-212.
HAO R J, WANG J ZH, LI J, et al.. Velocity planning for large inertia servo system based on power and torque constraints[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(3):206-212. (in Chinese)
- [11] 李贤涛,张晓沛,毛大鹏,等.高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制[J].*光学精密工程*, 2017, 25(9):2428-2436.
LI X T, ZHANG X P, MAO D P, et al.. Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9):2428-2436. (in Chinese)
- [12] 张艳,张淑梅,乔彦峰.舰载光电设备参考模型扰动估计的前馈控制[J].*光学精密工程*, 2013, 21(5):1213-1221.
ZHANG Y, ZHANG SH M, QIAO Y F. Main axes AC servo control system for 2 m telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1213-1221. (in Chinese)

作者简介:



祁超(1990—),男,江苏靖江人,博士研究生,2011年于华东理工大学获得学士学位,2014年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事机电伺服系统动力学建模及高性能运动控制方面的研究。E-mail: nudtqichao@126.com

导师简介:



范大鹏(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,1991年于华中科技大学获得博士学位,主要研究方向为数控技术、嵌入式系统以及精密光电跟踪平台的测控技术。E-mail: fdp@nudt.edu.cn