

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.019

基于误差驱动的运动曲线规划方法

黄蕾, 杨素

(中国兵器工业第五八研究所智能检测事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为保证试验装置的现场运行符合高精度和低成本的需求, 提出一种基于误差驱动的运动曲线规划方法。以研制与调试某试验装置为例, 基于误差驱动进行了运动曲线规划, 确定装置设计精度要求, 对精度进行合理分配和合成, 并给出特定标定曲线以验证该装置的轨迹跟踪特性。结果表明: 该方法能提供符合装置精度控制要求的运动曲线规划, 机构运行平稳且具有良好的跟踪特性。

关键词: 误差驱动; 精度控制; 运动曲线; 规划

中图分类号: TP277 **文献标志码:** A

Method of Planning Motion Curve Based on Error Driving

Huang Lei, Yang Su

(Dept. of Intelligent Detection, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to ensuring the need of high-accuracy and low cost that the test facility runs scene, this paper suggest that one kind of error drive-based motion curve plans method. Taking developing and testing a test facility as example, planned the motion curve based on error drives, make sure the request designing accuracy for design, carry out rational assignment and combining on accuracy, and give the specially scaling curve to verify the device of track characteristic property. As a result, the method can provide the motion curve planning of the controlling accuracy of the test facility, and the device can operate in stable states and have fine tracking characteristic property always.

Key words: error drive; accuracy control; motion curve; planning

0 引言

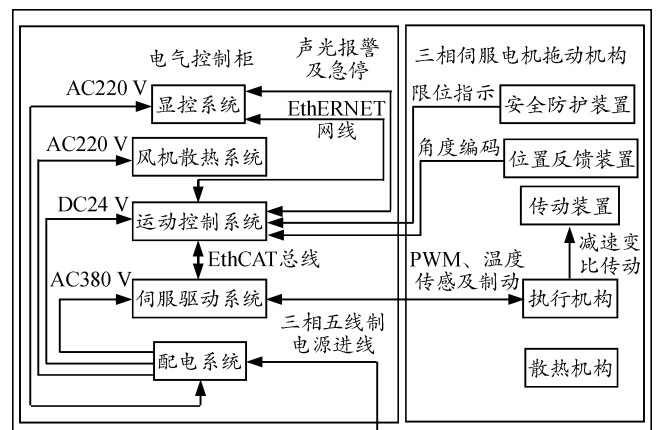
随着科学技术的日益发展, 对精密伺服控制及传动工程的精度要求也越来越高。过去采用单纯提高精密工程组成系统装备精度的措施已不能完全适应装备运行的高精度、低成本要求, 必须采取一整套自动化解决方案以无缝集成装置各部件并提供用户所需接口, 这已成为当今国内外关注的研究热点领域^[1]。笔者以研制与调试某试验装置为例, 提出一种基于误差驱动的运动曲线规划方法, 并通过实验验证该装置的轨迹跟踪特性。

1 试验装置组成

该试验装置采用倍福自动化解决方案, 以角位移传递为基础, 以德国倍福自动化公司的 CX1020 嵌入式 PC 用作预设曲线生成, 以 AX5112 数字式伺服驱动器用作运动曲线规划, 并以规划出的预设运动曲线为基准信号, 伺服电机内置 11 位高分辨率编码器输出信号作为半闭环角度反馈信号, 实时测量电机在不同转速下电机编码器的输出信号, 并与同步采集的圆光栅输出信号进行比较, 研究两者的

差值和差值变化, 寻找其规律, 以实现定位精准的轨迹跟踪。

试验装置主要由电气控制柜及三相伺服电机拖动机构构成, 电气控制柜主要实现配电、驱动、运动曲线生成与规划、声光显示及报警等功能, 三相伺服电机拖动机构主要支撑模型在一定角度范围内以特有频率段作偏航、滚转及俯仰简谐振动。某试验装置功能简图如图 1 所示, 机构图如图 2 所示。



用户指定三相动力电源

图 1 某试验装置功能简图

收稿日期: 2012-07-16; 修回日期: 2012-07-30

作者简介: 黄蕾(1981—), 女, 四川人, 硕士, 从事测控技术、工业自动化研究。

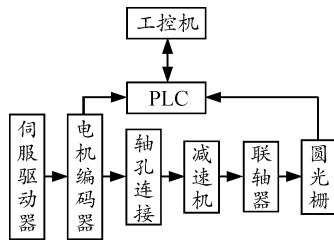


图 2 某试验装置机构图

2 运动曲线规划

基于误差驱动的运动曲线规划是依据标准信号与测量信号的比对实现的。通过 2 个信号的比对，可以测出试验装置的误差。标准信号由图 2 中工控机、PLC 及伺服驱动器 3 部分组成的伺服系统产生，测量信号由编码器产生。笔者所述的基于误差驱动的运动曲线规划是基于以一定角度及频率范围内做简谐振动的试验装置实现的，该试验装置由偏航/滚转及俯仰机构组成，该装置的总体精度要求为：角度运行范围：俯仰 $\pm 15^\circ$ 、偏航/滚转 $\pm 25^\circ$ ；最大角振幅： 10° ；运动频率： $0.2 \sim 2 \text{ Hz}$ ；振幅控制精度：优于 0.1° ；振动频率控制精度：优于 0.002 。在 AX5112 中调用相关功能模块预设简谐振动曲线。依据试验装置总体精度要求，知预设曲线应满足以

下运动位移方程：

$$\theta(t) = \theta_0 + 10 \times \sin(2\pi ft), 0.2 \text{ Hz} \leq f \leq 2 \text{ Hz} \quad (1)$$

式 (1) 中， θ_0 为运行时机构初始相位，即图 3 中的起始点。则俯仰机构的 $\theta_0 \in [-5^\circ, +5^\circ]$ ，则偏航/滚转机构的 $\theta_0 \in [-15^\circ, +15^\circ]$ 。

3 精度分析

将基于误差驱动的运动曲线规划应用到具体装置上，必须要按照装置总体精度要求进行精度分析、分解与控制。由总体指标知，该试验装置精度控制主要取决于振幅控制精度与频率控制精度，而振幅控制精度又包括初始相位(起始点)精度控制及预设运动曲线振幅精度控制。

3.1 初始相位(起始点)精度控制

该试验装置采用双闭环结构加强稳定性，与电机同轴安装单圈绝对值编码器反馈电机转角构成半闭环；经减速机在拖动机构加装增量式角度编码器反馈机构转角构成全闭环。预设曲线输出角度 $\theta(t)$ ，电机转角反馈输出 $\theta(t)'$ ，机构转角反馈输出 $\theta(t)''$ ，经鉴相器鉴相后，得出误差信号 $e\theta_0$ ，并判断振幅控制精度是否超限 ($\leq 0.1^\circ$)，若超限则重新规划起始点。试验装置的初始相位调整简图如图 3 所示。

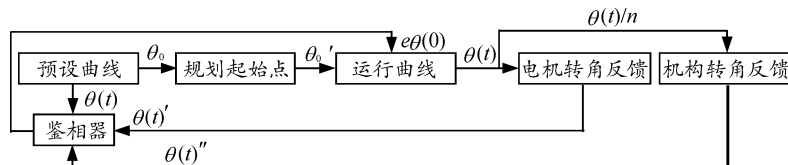


图 3 某试验装置初始相位调整简图

图 3 中， n 为减速比，该试验装置取 $n=40$ 。在系统偏差内， $\theta(t)$ 、 $\theta(t)'$ 与 $\theta(t)''$ 是满足同时与同步性的，则 $e\theta_0$ 为机构运行时设置点(初始点)与反馈初始点之间的偏差，试验装置要求此偏差优于 0.1° ，设 θ_0 为运动参照坐标系原点，则装置振幅起始点控制精度仅取决于角度反馈装置的调零精度。因半闭环所用的角度编码器是与电机同轴安装的，出厂时就已装配完成，所以零位误差极小，而全闭环的零位误差受增量编码器安装位置与方式、调零精度及整套机构运行稳定性影响较大。综上， $e\theta_0$ 主要来自于半闭环用单圈绝对值编码器与全闭环增量角度编码器反馈角度值，主要受增量编码器的零偏影响。

3.2 预设曲线振幅精度控制

设置两相邻时间参照点 $t_1=t$ 及 $t_2=t+\Delta t$ ，将 t_2 及 t_1 代入式 (1)，相减并取绝对值得出：

$$20 \times \cos[\Pi(t + \Delta t / 2)f] \times \sin(\Pi \Delta t / 2f) \leq 0.1^\circ \quad (2)$$

因倍福驱动器中最小时间分辨率为 $62 \mu\text{s}$ ，典型值为 $500 \mu\text{s}$ ，最大值为 20 ms ^[2]，另根据公式 (1) 可知，预设曲线过 θ_0 点时，曲率最大，变速原动件加速度最大，使机构惯性力最大，振幅跟踪误差最大^[3]。此时 $t_1=0$ ， $t_2=\Delta t$ ，代入式 (2)，得

$$|\theta(\Delta t)| = 40 \times \sin(\Pi \Delta t f) \leq 0.1^\circ \quad (3)$$

式 (3) 中， f 取值范围为 $0.2 \sim 2 \text{ Hz}$ 。

假定装置按照预设曲线以平滑方式运行，公式 (3) 若满足条件，考虑到 Δt 不可能取很大，一般为典型值 $500 \mu\text{s}$ ，且 $\theta(t_2)$ 与 $\theta(t_1)$ 为相邻点，则 $\Pi \Delta t f$ 落在第一象限，取 $f=2 \text{ Hz}$ ，有 $\Delta t \leq 228 \text{ ms}$ ，则 $\Delta t \in [62 \mu\text{s}, 20 \text{ ms}]$ ，完全满足公式 (3)，且 $\sin(\Pi \Delta t f / 2) \approx \Pi \Delta t f / 2$ 。若装置以 2 Hz 频率及最大加速度启动时，

则 Δt 为试验装置的启动时间, 此值一般相对较大, 一般为 $10\sim 30$ s, 考虑落在第二象限, 取 $f=2$ Hz, 则 $\Delta t\approx 28.64$ s, 处于临界条件。

t 取非0值时, 公式(2)简化为

$$10\Pi\Delta t f \times \cos[\Pi(t+\Delta t/2)f] \leq 0.1^\circ \quad (4)$$

式(4)中, f 取值范围为 $0.2\sim 2$ Hz。考虑到半闭环所用的单圈绝对值编码器角度分辨率为2048, 令

$$t=n_0\Delta t, \Delta t=500\ \mu\text{s}, \text{代入 } 2\Pi f n_0 \Delta t = \frac{360}{2048}, \text{取 } f=2\ \text{Hz},$$

得出 $n_0=28$; 取 $f=0.2$ Hz, 得出 $n_0=280$, 设 $t=n_1\Delta t$, 其中 $n_1 \in N$, 则要求 $n_1 \geq 280$, 又该试验装置所用伺服驱动器AX5112-0000为数字式驱动器, 则取 $n_1=512$, $\Delta t=500\ \mu\text{s}$, 代入公式(4), 则有 $f \leq 6.37$ Hz, 包含 $[0.2\ \text{Hz}, 2\ \text{Hz}]$, 满足该试验装置运行频率的要求。

3.3 频率控制精度

针对装置频率控制精度优于0.002, 变 t 为常量, f 为变量, 任意设置2相邻频率参照点 f_1 及 f_2 , 以 f_1 为基准, 令 $|f_2-f_1| \leq 0.002f_1$, 则代入式(1), 两式相减并取绝对值得

$$\Delta\theta(f) = 20 \times \cos[\Pi a t] \times \sin[\Pi b t] \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta\theta(f) = |\theta(f_2) - \theta(f_1)|$, $a = (f_2 + f_1)/2$, $b = (f_2 - f_1)/2$ 。

取 f_2 为频率控制精度上限 $0.002f_1$, 代入式(5)并以 f_1 为变量将式(5)求一阶导数并令 $=0$, 求极值得

$$1.001 \times \sin(a f_1) \times \sin(b f_1) + t \cos(a f_1) \times \cos(b f_1) = 0 \quad (6)$$

式(6)中, $a = 1.001\Pi t$, $b = 0.001\Pi t$ 。

若式(6)成立, 则有

$$f_1 = \frac{14.32}{t} \text{ 或 } \frac{14\ 331.21}{t} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)求得极值为:

$$\Delta\theta(f_1)_{\max} | f_1 = \frac{14.32}{t} = \theta_0 + 10^\circ \quad (8)$$

$$\Delta\theta(f_1)_{\min} | f_1 = \frac{14\ 331.21}{t} = \theta_0 \quad (9)$$

由式(8)、(9)知, 当频率取最大控制精度(0.002)时, 试验装置所作的简谐振动极大值为 θ_0+10° 或 θ_0 。联合考虑式(7)、(8)、(9), 可知当机构以2 Hz频率且以最大控制精度(0.002)运行, 启动阶段即能达到极大值, 若 θ_0 处于临界点时需及时响应机械限位

(安全角度)信号, 且响应时间 $\leq \Delta t$ 。

4 轨迹跟踪

电机的动态性能、驱动器与PLC的处理能力联合决定了该试验装置轨迹跟踪的精度。笔者选用倍福的低惯量与高动态较佳结合的AM3072K三相伺服电机作为该试验装置的拖动电机。该款电机具有以下特性: 额定转速1500 r/min; 最大转速6000 r/min; 额定转矩25.1 Nm; 峰值扭矩118.8 Nm; 转矩系数为3.23 Nm/A; 转子惯性转矩(带制动)66.14 kgcm²; 制动惯性转矩1.64 kgcm²; 静止摩擦转矩0.16; 允许轴端径向力1300 N; 允许轴向力500 N; 典型回程间隙0.2°mech^[4]。

将与AM3072K同轴安装的单圈绝对值编码器产生的测量信号反馈回驱动器, 作为电流(转矩)环、速度环与位移环的输入参数; 增量式圆光栅编码器产生的测量信号经由倍福的1通道增量编码器Sin/Cos接口模块EL5021进入PLC采集、分析、处理并比对。该试验装置控制核心是倍福所提供的自动化解决方案, 是基于有限状态机的, 根据文中第3章所述可知, 该解决方案完全满足该装置总体精度需求; 因此, 笔者只需建立并优化该试验装置的运行状态, 组成状态矩阵, 构建最优有限状态机, 调用倍福专家系统所提供的基于CNC的伺服控制算法功能块及用户接口无缝集成自编控制算法, 就可以优化基于误差驱动所规划的运动曲线, 实现该试验装置的无偏运行。

因该试验装置的精度控制较严, 全频率及全振幅范围内的运动曲线较为复杂, 所以需预设一簇曲线以标定试验装置。比较振幅精度与频率精度控制的数据采样点, 取大值, 即取采样点为901, 采样时间间隔 Δt 取0.256 s, 采样频率间隔取0.002 Hz, 因TwinCAT PLC软件提供与Excel的数据接口, 则通过Excel拟合曲线作为试验装置的标定曲线, 如图4。

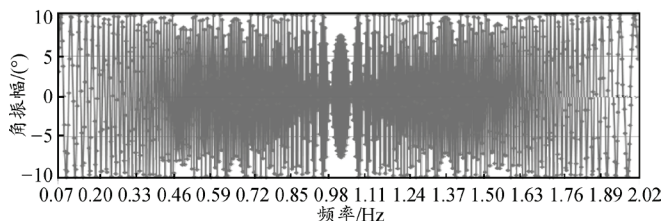


图4 某试验装置标定曲线 Excel 拟合图

图4中, 横坐标(X轴)为频率(f)/时间(t)虚拟轴, 纵坐标(Y轴)为角振幅驱动轴, 其中设置初始

相位 $\theta_0=0^\circ$ 。图 4 知, 该标定曲线已经反映出周期性, 完全可用作试验装置做简谐振动的标定曲线, 且该曲线不唯一, 只要满足装置总体指标并具有周期性的曲线均可用作标定曲线。

5 结论

基于误差驱动的运动曲线规划方法已经在某试验装置上得到成功应用。应用结果表明: 该方法能够提供符合装置精度控制要求的运动曲线规划, 机构运行平稳且具有良好的跟踪特性。下一步, 笔者将构建有限状态机的状态矩阵, 在该试验装置的现场长期运行过程中, 记录关键状态, 搭建数据库, 完善该状态矩阵, 以不断地对该方法进行优化。

(上接第 66 页)

表 1 测量数据及误差

标准值/ns	测量值/ns							均值/ns	标准差/ps	相对误差/%
	1	2	3	...	1998	1999	2000			
20	19.992	20.001	20.030	...	19.979	20.003	19.997	19.92	71	0.40
30	30.006	30.024	29.992	...	29.897	29.991	30.017	29.94	74	0.20
40	39.987	39.993	40.005	...	40.021	39.976	40.012	39.98	68	0.05
...
290	289.880	289.896	290.798	...	290.009	290.192	289.878	289.89	73	0.04
300	299.899	300.043	300.015	...	300.021	299.997	299.989	299.86	77	0.05
310	309.994	309.998	309.985	...	310.003	310.019	309.991	309.91	69	0.03

以上实验数据表明: 时间测量的标准差大约为 75 ps, 如果不考虑测量系统中其他部分的误差, 由此得到的距离测量精度为 1.12 cm。基于 TDC-GP2 时间间隔测量系统能够满足系统对高精度时差测量的要求, 适合应用于近距离高精度定距的脉冲激光引信中。

6 结论

笔者实现了基于 51 单片机和 TDC-GP2 芯片脉冲激光测距系统的软硬件设计。该时间间隔测量方法的时间测量精度可以达到 65 ps, 能够满足脉冲激光测距系统中的精度要求。因为 TDC-GP2 芯片具有功耗小、精度高、反应时间比较快的特点, 尤其适合需要快速或动态测量的引信定距系统。

参考文献:

[1] 黄小明. 基于误差分解与溯源的动态精度实验系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2009: 1-5.
 [2] 德国倍福自动化公司. AX5000 伺服驱动器操作手册 V1.29[S]. 德国: BECKHOFF, 2008, 12(18): 23.
 [3] 李仁军, 刘宏昭, 李鹏飞, 等. 混合驱动机构给定运动轨迹的生成与检测实验研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(12): 1618.
 [4] 德国倍福自动化公司. Documentation Synchronous servomotor AM3000 and AM3500 V1.3[S]. 德国: BECKHOFF, 2010, 9(21): 49.
 [5] 杨爱芬, 刘茂全, 张超. 小型光电伺服转台的设计及误差分析[J]. 兵工自动化, 2011, 30(5): 11-13.

参考文献:

[1] 崔占忠, 宋世和. 近感引信原理[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 1-18, 159-164.
 [2] 虞静, 江虹, 唐丹, 等. 一种提高脉冲激光测距中时间测量精度的方法[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 19-20.
 [3] ACAM Corporation. TDC-GP2 Datasheet[Z]. Germany: ACAM Corporation, 2006: 2-21.
 [4] 张延, 黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法[J]. 天文学进展, 2006, 23(1): 12-14.
 [5] 姚万业, 龙洋, 张东峰, 等. 基于 TDC-GP2 的激光测距飞行时间测量系统[J]. 工矿自动化, 2008(6): 47-48.
 [6] Silicon Laboratories. C8051F120-Mixed Signal ISP Flash MCU Family[Z]. America: Silicon Labs, 2004: 189-199, 239-261, 277-289.