

文章编号 1004-924X(2025)14-2231-11

绝对重力仪托车运动控制策略研究与应用

牟宗磊¹, 李清孟¹, 冯金扬^{2,3}, 王启宇^{2,3}, 吴书清^{2,3},
李春剑^{2,3}, 要佳敏^{2,3}, 胡 若^{2,3*}

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国计量科学研究院, 北京 100029;

3. 国家市场监督管理总局重点实验室(时间频率与重力计量基准), 北京 100029)

摘要:激光干涉式绝对重力仪在地球科学、资源勘探、地质调查、地震监测等领域发挥了不可替代的重要作用。测量过程需要利用托车实现落体的平稳释放和承接,托车的运动控制精度直接影响重力测量结果。为了提高绝对重力仪托车运动控制精度,设计改进S型曲线绝对重力仪托车运动控制策略,并对绝对重力仪托车的运动特性进行研究。首先,在有刷直流电机数学模型基础上构建伺服电机传动系统传递模型。接着,设计改进S型的托车运动曲线,对比分析托车理想位移曲线与实际位移曲线之间的相关性。最后,基于自主研发的NIM-3A型绝对重力仪,搭建激光干涉信号数据采集系统采集托车运动数据,并对实测托车运动数据进行分析。试验结果表明:本文所设计的改进S型托车运动曲线,使托车实际运动位移与托车理想位移之间的决定性系数 $R^2 > 0.99$,实际托车运动前0.05 s的位移标准差减小约1/2,重力测量数据的有效率提高9.3%。研究成果可为优化激光干涉型绝对重力仪的性能提供一定的技术支撑。

关键词:激光干涉型绝对重力仪;托车运动;改进S型曲线;有刷直流电机

中图分类号:TP273+.1 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253314.2231

CSTR:32169.14.OPE.20253314.2231

Research and application of absolute gravimetric pallet motion control strategy

MOU Zonglei¹, LI Qingmeng¹, FENG Jinyang^{2,3}, WANG Qiyu^{2,3}, WU Shuqing^{2,3},
LI Chunjian^{2,3}, YAO Jiamin^{2,3}, HU Ru^{2,3*}

(1. College of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and
Technology, Qingdao 266590, China;

2. China Academy of Metrology, Beijing 100029, China;

3. Key Laboratory of Time Frequency and Gravity Primary State, State Administration for
Market Regulation, Beijing 100029, China)

* Corresponding author, E-mail: huruo@nim.ac.cn

Abstract: Laser interferometric absolute gravimeter plays an irreplaceable and important role in the fields of earth science, resource exploration, geological survey, earthquake monitoring and so on. The measure-

收稿日期:2025-01-03;修订日期:2025-04-02.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 42304190);深地国家科技重大专项(No. 2024ZD1002504);绝对重力仪一体化减振支座研究(No. AKYZZ2403)

ment process needs to use the pallet to realize the smooth release and undertaking of the falling body, and the motion control precision of the pallet directly affects the gravity measurement results. In order to improve the motion-control accuracy of the absolute-gravimeter pallet, an improved S-curve absolute-gravimeter pallet motion-control strategy was designed and the motion characteristics of the absolute-gravimeter pallet were studied. Firstly, the servo-motor drive-system transfer model was constructed on the basis of the mathematical model of the brushed DC motor. Then, the improved S-shaped pallet motion curve was designed and the correlation between the ideal displacement curve and the actual displacement curve of the pallet was compared and analyzed. Finally, based on the self-developed NIM-3A absolute gravimeter, a laser-interference signal data-acquisition system was built to collect the movement data of the pallet truck and to analyze the measured pallet-movement data. The experimental results show that the improved S-type pallet motion curve designed in this paper makes the coefficient of determination R^2 between the actual pallet motion displacement and the ideal displacement of the pallet greater than 0.99, the standard deviation of the displacement in the first 0.05 s of the actual pallet motion is reduced by about 1/2, and the validity of the gravity measurement data is increased by 9.3%. The research results can provide certain technical support for optimizing the performance of laser interferometric absolute gravimeter.

Key words: laser interferometric absolute gravimeter; pallet motion; optimized S-curve; brushed DC motor

1 引 言

地球重力场是地球科学领域的重要内容之一,在国家基础测绘、地震监测、资源勘探、地球动力学和航空航天等领域都有不可替代的重要作用^[1-4]。高精度绝对重力测量可精准获得地面观测点的重力加速度值,并用重力加速度值作为监测重力场变化的基准。随着激光干涉技术的发展,激光干涉绝对重力仪重力测量精度越来越高^[5]。与原子干涉绝对重力仪相比,自由落体式重力仪操作简单、成本低、动态响应快、适应性强^[6]。因此,对自由落体式绝对重力仪的托车运动进行研究,对于提升重力测量的精度具有重要意义。JILA 实验室^[7]研制的 JILA 型绝对重力仪的传动结构中采用了“无拖曳下落腔”来支撑和承接落体。中国地震局地震研究所^[8]利用钢带式落体系统进行绝对重力仪落体仓的轨迹设计。这些国内外的研究成果表明,通过改善自由落体过程中的支撑与控制技术,可以显著提高绝对重力仪的测量精度,为精密重力测量提供了更为坚实的技术基础。

直流电机普遍应用在精密仪器领域中,如惯性导航系统^[9],其启动转矩大、控制简单。因此,对绝对重力仪托车的运动过程可以通过直流电机控制。传统电机速度曲线主要有梯形、指数型

和 S 型^[10],梯形曲线的加减速过程采用线性变化,这导致电机在达到最大频率时可能出现突变,无法实现平滑过渡。虽然指数曲线在加速阶段能实现较为平滑的运行,但其初始加速度较大,容易引发机械冲击,进而影响加速度的增加^[11],相比之下,S 型曲线能有效避免速度突变,并解决平滑性问题。因此,S 型曲线在机器人运动轨迹规划^[12],数控机床高速加工^[13],汽车传动系统^[14]等场景应用广泛。本文将 S 型曲线运动规划应用到绝对重力仪托车运动控制中,并对 S 型曲线进行改进。设定运动距离、运动时间、变速时间即可规划整个托车运动过程,且曲线在不同托车负载情况下可以灵活判定调节,参数设置简单,移植方便。

在自由落体式绝对重力仪测量过程中,电机控制托车的运动,理论上托车与落体分离后,落体释放平稳,落体偏摆扰动加速度为最小,但实际测量过程中,托车加速时间精度在毫秒量级,且托车初始加速度大易引起机械冲击^[15],使得托车运动重复性降低,进而严重影响重力加速度的测量精度^[16]。目前,对自由落体式绝对重力仪托车运动仅限通过电机控制使得落体与托车分离、承接,而 S 型曲线可以使整个加速过程更平滑,在机械设备中有效避免了速度突兀变化,可以有效减少对机械结构的冲击,延长设备的使用寿命。

命,并且S型曲线能较好实现高精度的位置控制^[17]。因此,将S型曲线运用到自由落体式绝对重力仪托车运动控制中,减少电机引入的测量误差,可以有效提高重力测量精度。

2 托车运动曲线的设计及原理分析

直流电机根据主磁场的产生方式分为永磁式直流电机和电磁式直流电机。电磁式直流电机的磁场由励磁绕组(电磁铁)提供,包括串励、并励和复励等不同类型,而永磁式直流电机则由永磁体产生。绝对重力仪所用的电机为永磁式直流电机,采用空心杯结构,本文建立永磁式直流电机的数学模型。永磁式直流电机的等效电路图,如图1所示。

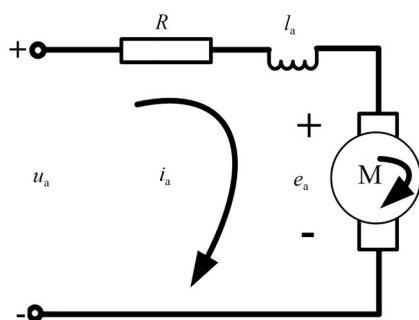


图1 永磁式直流电机等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of permanent magnet DC motor

电机电枢回路电压平衡方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} u_a = e_a + i_a R + l_a \frac{di_a}{dt}, \\ e_a = k_e \omega \end{cases} \quad (1)$$

其中: u_a 是电机电枢电压, e_a 是电机的反电动势, i_a 是电机电枢电流, R 是电枢电路电阻, l_a 是电枢电感, k_e 是反电动势系数, ω 是转速。

电机电磁转矩平衡方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega, \\ T_e = k_m I_a \end{cases} \quad (2)$$

其中: T_e 是电机的额定转矩, T_L 是负载转矩, J 是转动惯量, B 为阻尼系数, k_m 是转矩系数。

式(1)和式(2)为简化的直流电机回路电压平衡和电磁转矩平衡方程,在实际托车运动过程

中,考虑磁链和电压及电流的耦合关系,建立电机的数学模型,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3n_p\psi_f i_q}{2J} - \frac{B\omega}{J} - \frac{T_L}{J} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s i_q}{L} - n_p i_d \omega - \frac{n_p \psi_f \omega}{L} + \frac{u_q}{L} \\ \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s i_d}{L} + n_p i_q \omega + \frac{u_d}{L} \end{cases} \quad (3)$$

其中: R_s 为定子绕组的阻值, ψ_f 为转子磁链, n_p 为电机的极对数。

为了将电机模型应用于控制系统设计中,将式(3)进行拉普拉斯变换后将模型由时域变为频域,简化整理得到电机系统的传递函数 $G(s)$:

$$G(s) = \frac{N(s)}{N_m(s)} = \frac{B_1 s + B_2}{s^3 + A_1 s^2 + A_2 s + A_3} \quad (4)$$

其中: N 为托车设计位移曲线数据, N_m 为托车理想位移曲线数据。通过设计托车位移数据的动态模型,利用传递函数 $G(s)$ 来描述输入信号与托车理想位移之间的关系。输入托车设计位移数据经传递函数处理后,得到对应的托车理想位移响应,并对托车理想位移与实际位移进行相关性分析,实现对托车运动的精确控制和优化。结合S型曲线控制方法,进一步提高托车运动的重复性。

根据式(3)在Matlab中利用System Identification工具箱,选择传递函数估计模型进行辨识,其中,辨识得到的 $A_1=84.34$, $A_2=7.932 \times 10^8$, $A_3=2.463 \times 10^{10}$, $B_1=7.784 \times 10^8$, $B_2=2.471 \times 10^{10}$,可知绝对重力仪托车位移的传递函数 $G(s)$ 可表示为:

$$G(s) = \frac{N(s)}{N_m(s)} = \frac{7.784 \times 10^8 s + 2.471 \times 10^{10}}{s^3 + 84.34 s^2 + 7.932 \times 10^8 s + 2.463 \times 10^{10}} \quad (5)$$

目前,激光干涉型绝对重力仪测量 g 值的工作过程^[18]为落体在真空环境中自由下落一段距离,激光干涉仪用于实时测定落体在自由落体过程中的位置。每当测试落体下落半个激光波长时,干涉仪就会生成一个光学干涉条纹,这些条纹通过原子钟进行计数和计时,从而获得精确的时间和距离数据。在此过程,托车在传动机构最

高点加速下降,加速度 $>1g$ (g 为重力加速度),使得托车与落体分离,落体做自由下落运动,下落距离约为182 mm(设为 x)。之后托车托住落体,减速至最低点停止,减速距离约为90 mm(设为 x_1)。其中,落体顶部与托车顶部的距离约为10 mm(设为 x_2)。托车理想加速度曲线,如图2所示。

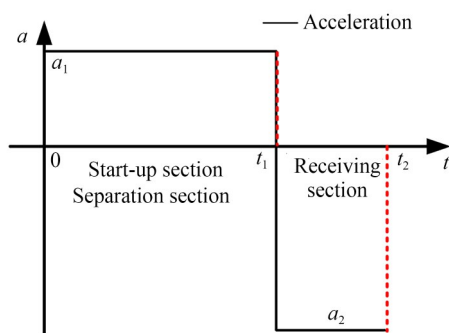


图2 托车理想加速度曲线

Fig. 2 Ideal acceleration curve for pallet

在整个测量重力值的过程中,托车的运动分为启动段、分离段和承接段,启动段和分离段落体的运动为自由下落:

$$x = \frac{1}{2}gt^2, 0 \leq t \leq t_1. \quad (6)$$

此时,托车与落体之间存在约10 mm的距离差:

$$x_2 = \frac{1}{2}a_1t^2 - \frac{1}{2}gt^2, 0 \leq t \leq t_1. \quad (7)$$

托车启动、分离段的速度 v 在 t_1 时刻为:

$$v_1 = a_1t, 0 \leq t \leq t_1. \quad (8)$$

托车承接段的运动方程为:

$$\begin{cases} 0 = v_1 + a_2t, t_1 \leq t \leq t_2 \\ x_1 = v_1t + \frac{1}{2}a_2t^2, t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases}, \quad (9)$$

其中: x 为落体自由下落距离, x_1 为托车减速距离, x_2 为托车与落体间的距离差, a_1 为托车启动、分离阶段的加速度, a_2 为托车承接段的加速度, v_1 为时间到达 t_1 时刻时的托车速度。式(6)~式(9)表示在整个重力测量过程中的托车运动过程。

为实现绝对重力仪托车的精确控制,使实际托车运动能较好的按照托车设计曲线来进行运动,依据托车理想加速度曲线设计了基础托车运

动曲线,但该曲线未考虑实际电机执行性能。该曲线的托车运动过程可分为:托车启动段为从0开始运动达到设定加速度,即托车的加速过程为加加速阶段(加加速即为 a 逐渐增大)、匀加速阶段(匀加速即为 a 保持不变),接着进入托车与落体分离段,最后托车与落体进行承接至停止运动(以下用基础曲线来代替此种控制策略)。基础曲线控制策略下的托车加速度曲线,如图3所示。

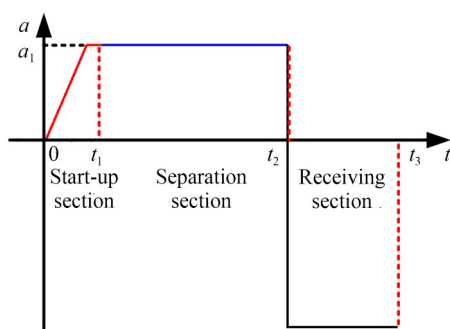


图3 基础曲线控制策略下的托车加速度曲线

Fig. 3 Acceleration profiles of the pallet under the base curve control strategy

由于托车加速时间精度为毫秒量级,且托车初始加速度过大易引起机械冲击,对托车重复性有较大影响。在此,参考数控机床高速加工时的轨迹规划选用S型运动曲线,以提高托车运动重复性^[13]。在电机运动过程中,采用S型曲线的加速策略,能够有效减小电机启动时的控制冲击,确保运动的平稳性,从而避免对系统的稳定性产生不利影响,以平稳地增加托车速度^[19]。S型曲线的加速启动阶段可分为3个阶段,分别为加加速阶段、匀加速阶段、减加速阶段(减加速即为 a 逐渐减小)。S型曲线控制策略下的托车加速度曲线,如图4所示。

目前,中国计量科学研究院研制的绝对重力仪所用电机为Maxon直流有刷伺服电机,该电机的额定转矩为177 N·m,可以得到电机正常运转时所能达到的最大线加速度为44 m/s²。在保证电机正常工作的前提下,为使托车运动不产生打滑、碰撞等危险工况,托车与落体需快速分离,可以防止落体在释放时引入较大的测

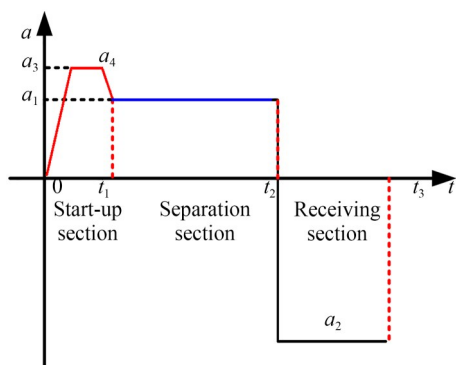


图4 S型曲线控制策略下的托车加速度曲线

Fig. 4 Acceleration profile of a pallet under S-curve control strategy

量误差。此时,若托车加速度较小会导致托车与落体在分离的过程中,落体追赶上托车发生碰撞;由于托车顶部距离落体约 10 mm,若托车加速度较大,会导致托车顶部与落体顶部发生碰撞,从而对托车、落体的机械部件造成损坏。所以,在实际测量重力加速度的过程中,托车与落体不仅要保证快速分离,且分离距离要在合理范围,使得托车与落体分离后可以保持较为稳定的分离距离。

而 S 型曲线受其本身匀加速阶段的限制,导致 a_1 的值不能设置较大,进而托车与落体不能较快分离。因此,对 S 型曲线进行改进,将其匀加速阶段改为减加速阶段,以获取较大的启动加速度 a_1 ,同时,为保证落体在下落过程中与托车可以保持较为恒定的分离距离,使托车与落体不会发生碰撞,减加速阶段后需要加加速阶段快速提升托车速度。

通过上述分析可知,基于 S 型曲线加速阶段,为简化托车启动流程,确保托车与落体精准分离,需对 S 型曲线启动阶段予以修正。改进后的托车启动段,分为加加速、减加速、加加速三个阶段。为提升运动控制器对电机的响应效能,实现快速分离并规避提前承接,省去匀加速段,使托车启动加速更平稳,运动重复性更高,同时,通过改进 S 型曲线调节托车与落体的分离距离,以实现托车与落体软承接。其中,改进 S 型控制策略下的托车运动加速度曲线,如图 5 所示。

为更直观对比 S 型曲线与改进 S 型曲线启动

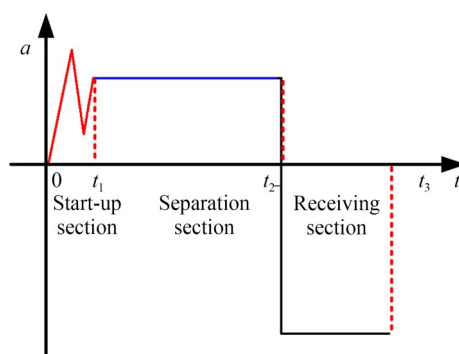


图5 改进S型曲线控制策略下的托车加速度曲线

Fig. 5 Acceleration profile of a pallet under optimized S-curve control strategy

段加速度 a_1 的数值,将托车顶盖与落体顶部距离 10 mm 作为分离距离的边界条件。基于电机系统传递模型得到托车理想位移响应,并与落体理想下落位移做差,以通过 Matlab 仿真分析两种控制策略下的分离距离。S 型曲线与改进 S 型曲线启动段加速度及分离距离对比,如图 6 所示。

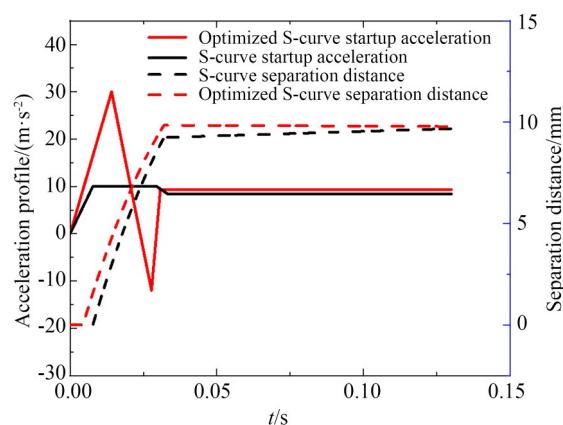


图6 S型曲线与改进S型曲线启动段加速度及分离距离对比

Fig. 6 Comparison of acceleration and separation distance of startup segment between S-curve and optimized S-curve

如图 6 所示,在保证托车顶盖与落体顶部不碰撞的前提下,即托车与落体间的分离距离最大为 10 mm,增加启动段加速度 a_1 的值, S 型曲线 a_1 的值仅能达到 10 m/s²,而改进 S 型曲线 a_1 的值可以达到 30 m/s²,且改进 S 型曲线下的托车与落体分离更快,更稳定。

3 绝对重力仪托车运动过程测量系统

为了验证改进 S 型托车运动曲线的先进性,在此基于 NIM-3A 型绝对重力仪搭建托车运动测量系统,并对托车运动特性进行研究。

激光干涉式绝对重力仪以激光波长作为长度基准,以铷原子钟作为时间基准^[18]。角锥棱镜固定在托车外壳与托车共同运动,用激光干涉法测量托车的下落距离 l ,用铷原子钟同步的时钟信号测量对应的下落时间 t 。绝对重力仪托车运动过程测量系统,如图 7 所示。

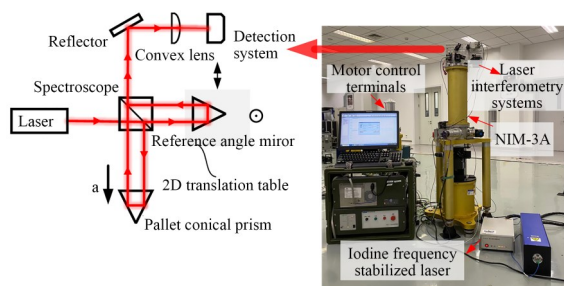


图 7 绝对重力仪托车运动过程测量系统

Fig. 7 Absolute gravimetric pallet motion process measurement system

实际测量托车运动时,调节托车运动测量装置的激光光源、分光镜的角度,使测量光向下垂直进入托车外罩角锥棱镜底面,出射后经参考角镜和分光镜合束后与参考光发生干涉,干涉信号被光电探测器接收;当绝对重力仪的电控柜控制落体做自由下落运动时,光电探测器同步进行干涉信号采集,经过计算得到托车在下落过程中的位移-时间变化数据 $l=f(t)$,干涉仪测量的位移为 $l=N\lambda/4$,其中: λ 为激光光源的波长, N 为干涉条纹中过零点的个数,结合每个过零点对应的时间,得到被测物体的位移-时间曲线。

在三种不同托车运动控制策略下进行试验,试验地点为中国计量科学研究院昌平院区。基于 NIM-3A 型绝对重力仪、激光干涉测量系统、电机控制终端、碘稳频激光器等硬件设备,搭建了一套绝对重力仪托车运动过程测量系统。

NIM-3A 型绝对重力仪为我国重力加速度校准社会公用计量标准装置,仪器机械状态稳定可

靠^[20],所以本文在 NIM-3A 型绝对重力仪调试状态下进行试验。激光干涉测量系统所用的光电探测器是四象限硅光敏二极管,具有较快的响应时间,适合高速光信号采集。在光电探测器基础上搭建可自由调节的激光干涉测量系统,为保证试验数据的准确性必须校准测量光束垂直度^[21],需将激光光源、分光镜、固定棱镜以及光电探测器调整到合适的角度和位置,使测量光向下垂直进入托车外罩角锥棱镜底面,测量光从托车外罩角锥棱镜出射后,经固定棱镜和分光镜反射与参考光合束发生干涉,干涉信号被光电探测器接收,观察干涉信号幅值变化并将其调节至变化幅度最小。以此来保证托车下落运动过程中始终产生可见度良好的干涉条纹。

4 测量结果分析

通过设计托车位移数据的动态模型,利用传递函数 $G(s)$ 来计算输入信号与托车理想位移之间的关系。输入托车设计位移数据经传递函数处理,得到对应的托车理想位移响应。本次试验采集了三种不同托车运动控制策略下的试验数据,将得到的托车数据进行处理,与托车理想位移进行对比分析。托车在真空中下落时,激光测量系统通过监测干涉条纹的变化精确测量托车的位移,托车位移 x 可表示为:

$$x = \sum_{i=1}^k x_i = \sum_{i=1}^k \frac{\lambda}{2}, \quad (10)$$

其中: λ 为激光波长,每种控制策略下得到的托车位移数据各为 300 次下落运动。

在绝对重力仪工作过程中,承接段为落体自由落体完成后与托车接触阶段,此阶段对重力测量值的影响较小。在此,着重分析 0~0.25 s 托车运动过程。经分析可知,基础曲线控制策略下托车理想位移与实际位移决定性系数 $R^2 > 0.98$,S 型曲线控制策略下托车理想位移与实际位移决定性系数 $R^2 > 0.99$,改进 S 型曲线控制策略下托车理想位移与实际位移决定性系数 $R^2 > 0.99$,说明 S 型和改进 S 型托车的实际运动能很好地遵循理论设计,托车控制的精度较高。三种控制策略下托车理想位移与实际位移曲线对比图,如图 8 所示。

如图 8 所示,基础曲线控制策略下电机控制

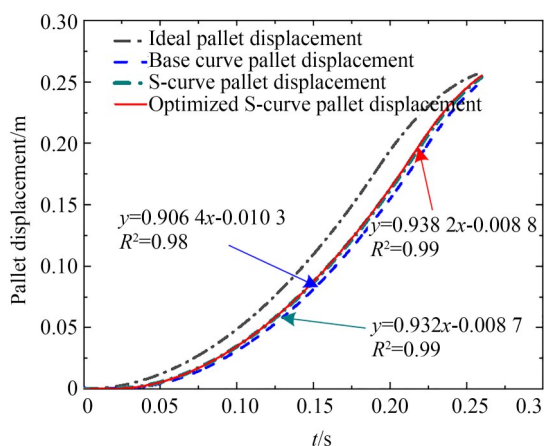


图 8 三种控制策略下托车理想位移与实际位移对比图
Fig. 8 Comparison of ideal displacement and actual displacement of pallet under three control strategies

托车的精度最差,S型和改进S型托车的实际运动与理想运动的相关性基本一致,为进一步研究三种控制策略的优劣,对三种控制策略下的理想速度与实际速度进行对比分析,如图9所示。

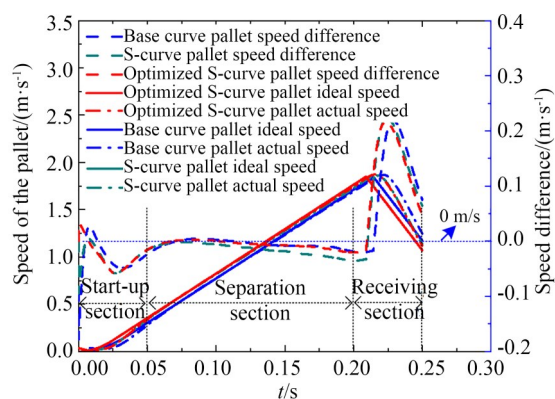


图 9 三种控制策略下托车理想速度与实际速度对比
Fig. 9 Comparison of ideal and actual pallet speeds under the three control strategies

如图9所示,通过三种控制策略下托车理想速度、实际速度及其速度差的对比分析,可以得到,在0.05 s前(启动段)基础曲线的速度差有较大突变;在0.05~0.2 s这个时间段(分离段)三种控制策略的速度差基本保持在0 m/s附近,说明分离段电机控制托车能较好按照理想速度进行运动,在此时间段内无明显打滑现象;在0.2~0.25 s时间段(承接段),落体与托车进行承接,此阶段对重力测量结果影响较小。在此,重点分析

前0.05 s托车运动特性。前0.05 s三种控制策略托车理想位移与实际位移对比,如图10所示。

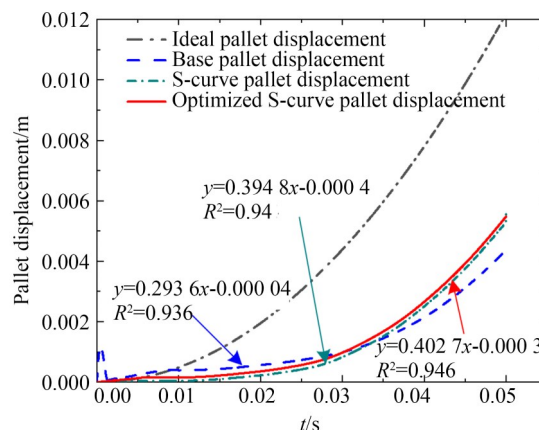


图 10 前0.05 s三种控制策略托车理想位移与实际位移对比

Fig. 10 Comparison of ideal displacement and actual displacement of three control strategies for the first 0.05 s trolley

对前0.05 s三种控制策略托车理想位移、实际位移进行局部相关性分析,电机从接收控制信号再到实际执行之间的时间延迟导致实际响应往往滞后于理想响应,所以前0.05 s托车理想位移与实际位移的差距较大。在此时间段内,基础曲线控制策略下托车理想位移与实际位移决定性系数 $R^2 > 0.93$,其拟合方程为 $y = 0.293 6x + 0.000 04$ 。S型曲线控制策略下托车理想位移与实际位移决定性系数 $R^2 > 0.94$,其拟合方程为 $y = 0.394 8x - 0.000 4$ 。改进S型曲线控制策略下托车理想位移与实际位移决定性系数 $R^2 > 0.946$,其拟合方程为 $y = 0.402 7x - 0.000 3$ 。可以看出:三种控制策略下托车实际运动与托车理想运动都有较大差异,但基础曲线控制策略在此时间段与理想运动差异依旧最大。如图10所示,S型托车位移曲线与改进S型托车位移曲线重合度较高,决定性系数 R^2 差异不大。因此,为确定优化控制方法,需进一步分析三种控制策略下的托车位移重复性。通过计算每种控制策略下的300次托车运动位移标准差,来量化托车位移的重复性。前0.05 s三种控制策略下的托车位移标准差对比,如图11所示。

如图11所示,随着绝对重力仪托车启动至下

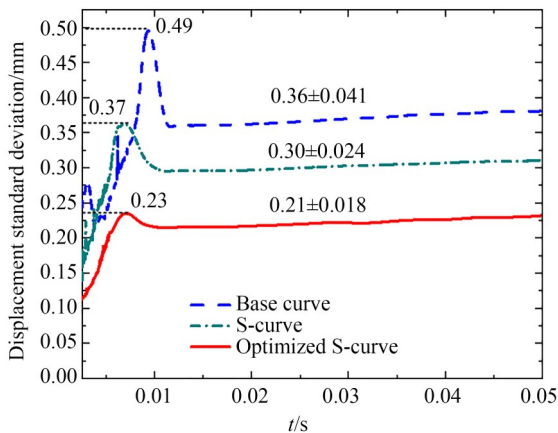


图 11 0.002 5~0.05 s 三种控制策略下位移标准差对比
Fig. 11 Comparison of standard deviation of pallet displacement under three control strategies from 0.002 5 s to 0.05 s

落速度增大,干涉条纹频率增加,当干涉条纹频率达到一定值时,光电探测器对干涉条纹信号进行采集,为了保证数据分析的准确性,对 0.002 5~0.05 s 的托车位移标准差进行分析,由图 11 可知,此时间段的基础曲线托车位移标准差平均值为 0.36 mm,测量误差为 ± 0.041 mm,标准差最大可达到 0.49 mm。S 型托车位移标准差平均值为 0.3 mm,测量误差为 ± 0.025 mm,且此时间段标准差最大不超过 0.37 mm。改进 S 型托车位移标准差平均值为 0.21 mm,测量误差为 ± 0.018 mm,且此时间段的标准差最大仅为 0.23 mm。经对比分析可知,改进 S 型曲线在前 0.05 s 的标准差最小,分散性更低。

为研究三种不同控制策略对重力加速度的影响,将采集到的重力加速度数据进行处理,为剔除测量过程中出现的异常值,采用常见的数据处理方法 3σ 法则^[22](即三倍标准差法则)。首先,计算出每种控制策略下所有重力测量数据的平均值和标准差,并根据 3σ 法则判断每个测

量值是否在合理范围内:若某个测量值超出平均值 ± 3 倍标准差的区间,则视为异常值并剔除。剔除掉测量 g 值中的异常值,此时剩余的测量 g 值在 3σ 范围内,将在 3σ 范围内的正常数据与未剔除的原始数据比值称为重力测量数据的有效率(以下简称有效率)。可得到三种不同托车控制策略下的有效率分别为 88.7%(基础曲线)、92%(S 型曲线)、98%(改进 S 型曲线)。三种控制策略下测量 g 值及异常值图,如图 12 所示。

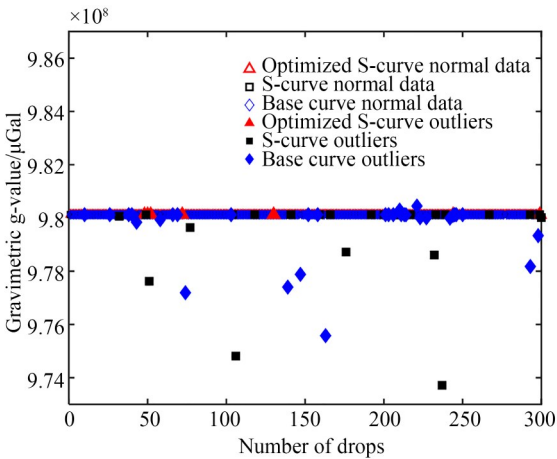


图 12 三种控制策略下测量 g 值及异常值
Fig. 12 Plot of measured g -values and outliers for the three control strategies

综上可知,通过分析托车理想位移与实际位移的关系,得到三种控制策略下理想位移与实际位移的决定性系数 R^2 ,进一步研究理想速度与实际速度之间的速度差,可知 0.05 s 前速度差均有较大突变,以此分析 0.05 s 前的托车位移标准差,得在改进 S 型的控制策略下,系统总体表现具有良好的精度和稳定性。三种控制策略下试验结果对比,如表 1 所示。

表 1 三种控制策略下试验结果对比

Tab. 1 Comparison of experimental results under three control strategies

Test	R^2	$R^2(0\sim 0.05\text{ s})$	Displacement standard deviation average(0.002 5~0.05 s)/mm	Efficiently/%
Base curve	0.98	0.93	0.36	88.7
S-curve	0.99	0.94	0.3	92
Optimized S-curve	0.99	0.946	0.21	98

5 结 论

本文基于NIN-3A型绝对重力仪搭建了托车运动过程测量系统,介绍了绝对重力仪的托车运动测量原理及托车运动曲线设计过程,评估了三种控制策略下托车位移的重复性。在托车运动测量过程中,使用激光干涉测量系统记录干涉信号,计算原始托车位移标准差,并用 3σ 法则对采集到的重力值进行重算,以托车理想与实际位移决定性系数 R^2 、托车位移重复性、测量重力值有效率来确定托车运动曲线改变对重力测量精度影响。试验结果表明,改进S型曲线托车理想与实际位移决定性系数 $R^2 > 0.99$,在启动阶段表现出最小的位移标准差,并且能够较快达到稳定状态,在0.05 s前的托车位移标准差约为基础曲线的1/2,同时,改进S型曲线的测量重力值有效率最高,达到98%,比基础曲线提高了9.3%。改进S型托车运动曲线可提高托车位移重复性,减小了托车运动为重力测量引入的测量误差。

参考文献:

- [1] MARSON I, FALLER J E. G-the acceleration of gravity: its measurement and its importance [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1986, 19(1): 22-32.
- [2] FALLER J E. Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances [J]. *Metrologia*, 2002, 39(5): 425-428.
- [3] FALLER J E. The measurement of little g: a fertile ground for precision measurement science [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2005, 110(6): 559-581.
- [4] 王嘉沛, 韩宇飞, 张新林, 等. 我国绝对重力观测应用与研究进展 [J]. *地球与行星物理论评* (中英文), 2025, 56(3): 243-257.
WANG J P, HAN Y F, ZHANG X L, *et al.* Application and research progress of absolute gravity observation in China [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2025, 56(3): 243-257. (in Chinese)
- [5] 李振飞. 平台式激光干涉绝对重力测量的振动补偿

绝对重力测量技术正朝着更高精度和更广泛应用的方向发展,改变托车运动曲线,减小托车运动过程引入的测量误差,在提高激光干涉型绝对重力仪的测量精度、稳定性和重复性方面具有显著的技术优势。在后续工作中,针对不同型号的仪器设备,在野外测试环境下,围绕负载、温度等多元工况开展系统性研究,力求为未来重力测量试验提供更高精度的数据支撑与更可靠的有效性保障。

作者贡献声明:

- 牟宗磊:论文审核与编辑写作;
李清孟:测量试验的设计及数据整理、分析和论文撰写;
冯金扬:提供研究所需的硬件平台;
王启宇:整理试验数据;
吴书清:负责研究项目的整体管理;
李春剑:分析试验数据;
要佳敏:算法处理;
胡若:测量方法的提出,论文构思。

技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2023.

- LI Z F. *Research on Vibration Compensation Technology of Platform Laser Interferometry Absolute Gravity Measurement* [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [6] 黄攀威. 可搬运高精度85Rb冷原子绝对重力仪研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
HUANG P W. *Study on Portable High-Precision $Sup > 85rb$ Cold Atom Absolute Gravimeter* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] ZUMBERGE M A, RINKER R L, FALLER J E. A portable apparatus for absolute measurements of the earth's gravity [J]. *Metrologia*, 1982, 18(3): 145-152.
- [8] 邹舟. 高精度绝对重力仪落体控制系统设计 [D]. 武汉: 中国地震局地震研究所, 2014.
ZOU Z. *Design of Falling Body Control System for High Precision Absolute Gravimeter* [D]. Wuhan: Institute of seismology, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese)

- [9] 董旭, 董建树, 王惠, 等. 一种捷联惯性导航系统的旋转控制机构设计技术[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 110-117.
DONG X, DONG J S, WANG H, *et al.* Design technique on rotating control mechanism based on SINS [J]. *Computer Measurement & Control*, 2022, 30(10): 110-117. (in Chinese)
- [10] 张航宁, 李文新, 梁绪. 基于跟踪微分器的步进电机自适应速度曲线设计[J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48(2): 88-95.
ZHANG H N, LI W X, LIANG X. Design of adaptive speed profile of stepper motor based on tracking differentiator[J]. *Aerospace Control and Application*, 2022, 48(2): 88-95. (in Chinese)
- [11] 张占立, 康春花, 郭士军, 等. 基于单片机的步进电机控制系统[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(3): 28-31, 50.
ZHANG Z L, KANG C H, GUO S J, *et al.* Control system of step-motor based on microcontroller unit[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2011, 38(3): 28-31, 50. (in Chinese)
- [12] 周丰禄. 基于改进S曲线的机器人平滑轨迹规划研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
ZHOU F L. *Research on Robot Smooth Trajectory Planning Based on Improved S Curve* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2021. (in Chinese)
- [13] 张相胜, 朱道坤, 潘丰. 数控加工中S型曲线柔性加减速控制算法研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(12): 68-73, 124.
ZHANG X S, ZHU D K, PAN F. Research on S-curve flexible Acc/Dec control algorithm in NC machining[J]. *Manufacturing Automation*, 2020, 42(12): 68-73, 124. (in Chinese)
- [14] 付春梅, 顾德裕, 冯志华. PQS-3-D型汽车专用升降机传动系统的建模分析[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(1): 101-105.
FU C M, GU D Y, FENG Z H. Modeling and analyzing of the transmission system of the PQS-3-D CAR elevator [J]. *Machine Design & Research*, 2007, 23(1): 101-105. (in Chinese)
- [15] 朱耀麟, 孙博文, 任学勤, 等. 一种改进的S型曲线花式纺纱机调速方法[J]. 毛纺科技, 2020, 48(6): 72-76.
ZHU Y L, SUN B W, REN X Q, *et al.* Study on speed control regulation of S-shaped curved fancy spinning frame [J]. *Wool Textile Journal*, 2020, 48(6): 72-76. (in Chinese)
- [16] 吴琼. 高精度绝对重力关键技术研究[J]. 国际地震动态, 2012, 42(1): 35-36.
WU Q. Research on key technologies of high precision absolute gravity [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2012, 42(1): 35-36. (in Chinese)
- [17] MECKL P H, ARESTIDES P B. optimized s-curve motion profiles for minimum residual vibration" [C]. *Proceedings of the 1998 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No. 98CH36207)*, Philadelphia, PA, USA, 1998, 2627-2631. (in Chinese)
- [18] 吴书清, 李天初. 绝对重力仪的技术发展: 光学干涉和原子干涉[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0102002.
WU S Q, LI T C. Technical development of absolute gravimeter: laser interferometry and atom interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0102002. (in Chinese)
- [19] 张树刚, 赵佳. 基于S型曲线的包装堆垛机器人轨迹规划[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 136-140.
ZHANG S G, ZHAO J. Trajectory planning of packaging palletizing robot based on S-curve [J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(1): 136-140. (in Chinese)
- [20] LI C J, XU J Y, FENG J Y, *et al.* Correction of NIM-3A absolute gravimeter for self-attraction effect[C]. *Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. Changsha/Zhangjiajie, China.* SPIE, 2015: 944608. 1-944608. 6.
- [21] 王启宇, 冯金扬, 李春剑, 等. 面向绝对重力仪的光束垂直性快速调节[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 1-7.
WANG Q Y, FENG J Y, LI C J, *et al.* Fast alignment of beam verticality for absolute gravimeters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 1-7. (in Chinese)
- [22] 李春剑, 吴书清, 栗多武, 等. 光干涉绝对重力仪

测量 A 类不确定度优化[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1527-1538.

LI C J, WU S Q, SU D W, *et al.* Improvement

method for type A uncertainty of interferometric gravimeter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29

(7): 1527-1538. (in Chinese)

作者简介:



牟宗磊(1985—),男,山东日照人,博士,副教授,2012年于山东科技大学获得硕士学位,2018年于北京理工大学获得博士学位,现为山东科技大学电气与自动化工程学院电工电子中心副主任,主要研究方向为智能感知与测试、状态监测与故障诊断技术等。E-mail:mzl@sdust.edu.cn

通讯作者:



胡 若(1988—),男,湖北黄石人,博士后,副研究员,2013年于武汉理工大学获得硕士学位,2018年于北京理工大学获得博士学位,现为中国计量科学研究院力学与声学研究所/时间频率研究所博士后,主要研究方向为重力精密测量技术、信号采集及信号处理技术。E-mail:huruo@nim.ac.cn