

单向驱动往复式扫描反射镜模型

李海星, 姚园, 史磊

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘要: 提出了一种正反向 1:2 速比扫描模式的单向驱动往复式扫描反射镜模型, 通过采用不完全齿轮传动机构和弹簧阻尼元件, 在驱动元件不换向的前提下可实现反射镜正反转平稳切换。系统主要依靠弹簧的变形储能实现变速换向, 降低了传统直驱式单面扫描反射镜系统换向过程中的驱动力矩输出要求。在正反向匀速扫描行程中, 反射镜处于弹簧和驱动元件一对反作用力矩的共同作用下运动, 有效消除了齿轮传动间隙, 从原理上确保了系统传动精度。与传统直驱式单面扫描反射镜系统相比, 该系统的驱动元件无需正反向切换, 避免了传统系统因驱动元件频繁换向给电控设计带来的问题, 而且降低了系统对驱动元件性能要求, 在提高扫描频率方面更具优势。该模型在轻小化、大行程、高精度光学扫描系统研制方面具有较大的开发应用潜力。

关键词: 扫描反射镜; 方向切换; 不完全齿轮传动; 弹簧; 阻尼

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2097-06

Scan-retrace scanner model with single-direction rotational motor

Li Haixing, Yao Yuan, Shi Lei

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A scan-retrace optical scanner model without rotating direction change of the driving motor, was proposed. The scanner's fly-back angular velocity doubled its scan trip. By utilizing partially-cut gear transmission and spring-damper element, the system could realize stable scanner rotating direction change without the shift of driving motor current direction. Because the energy was mainly provided by the resilient member in the scanner rotating direction changing phase, it meant the driving motor was less demanding in the system than that in the traditional one. The scanner was subject to motor's driving torque and resilient member spring-back torque in scan and retrace trip. This design helped to eliminate gear clearance efficiently and could assure transmission accuracy of the system. Compared with traditional motor directly driving scanning system, rotational driving motor doesn't need current direction shift in this system, thus control system design is simplified, performance of driving motor is decreased and scan rate

收稿日期: 2012-12-02; 修订日期: 2013-01-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA701203)

作者简介: 李海星(1980-), 男, 助理研究员, 主要从事航空光学传感器结构设计及力学分析方面的研究。

Email: windchaser_lhx@163.com

is improved. This model plays a good potential solution for the compact, large trip, high precision optical scanning system development.

Key words: scanner; scan direction shift; partially-cut gear transmission; spring; damper

0 引言

扫描反射镜系统包括反射元件、执行元件和测量感知元件三大组成部分,它通过执行元件驱动反射元件来实现既定模式的光学扫描,在航空光学像移补偿、高精度目标指向、激光 3D 成像等领域有着重要应用^[1-3]。扫描反射镜作为航空光学成像系统的关键技术之一,得到了国内外相关领域的广泛重视。

从支撑和驱动模式来看,反射镜系统可分为两大类。其一是反射镜由挠性结构支撑,在压电陶瓷(PZT)或音圈电机(VCA)等直线驱动元件的驱动下,在平衡位置附近做小幅往复振动^[4-7]。

这类反射镜可充分利用系统的共振特性来实现低能耗、高频次扫描,具有结构简单、工作带宽高、能量需求小的优点。但是,其扫描行程小(毫弧度级)、角位移随时间呈非线性变化、旋转中心不固定、电控难度大,不适于行程大、扫描精度要求高的应用场合。其二是反射镜由一对轴承支撑,绕旋转轴往复摆动(单面反射镜)或连续转动(棱柱状多面反射镜)^[8-11]。这类系统具有行程大、扫描精度高、可控性好的优点。但是其工作带宽低、结构复杂。若采用棱柱状多面反射镜,可大大降低空占比、提高扫描效率,但反射镜结构尺寸大,不利于整机系统小型化。若采用单面反射镜,系统需要频繁正反向切换,工作带宽和扫描效率都会受到很大的限制,同时给驱动元件选型和控制系统设计都提出了较高的要求。

文中提出了一种基于单反射面结构的往复式扫描反射镜系统模型,通过传动机构设计,在驱动元件不换挡的前提下实现了反射镜正反向平稳切换。该系统可实现正-回扫 1:2 速比的扫描模式。与传统系统相比,该模型可有效降低系统空占比、提高扫描效率。

1 换向机构模型

传统的电机直驱式单面扫描反射镜系统,在提高系统扫描频率方面存在两点潜在的设计困难:

(1) 驱动元件需要在短时间内实现刹车和反向加速,系统要求其具有足够的瞬时做功能力和反应灵敏度。驱动元件性能要求比较苛刻;

(2) 由于驱动元件电流方向频繁改变,要实现高精度高频次扫描,控制系统设计难度大幅增加。

针对上述问题,提出了一种基于不完全齿轮传动的换向机构模型,基本原理如图 1 所示。

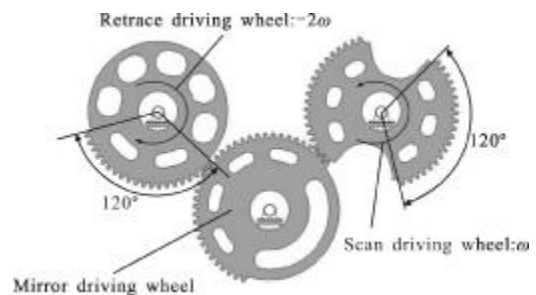


图 1 反射镜正反转换向机构模型

Fig.1 Model of mirror direction shift mechanism

该模型主要包括正扫驱动轮、回扫驱动轮和反射镜驱动轮三个组件,其中正扫驱动轮是一个由完整齿轮切去两个 60° 轮齿部分而形成的不完全齿轮,回扫驱动轮是一个由完整齿轮切去 240° 轮齿部分而形成的不完全齿轮,反射镜驱动轮是一个由完整齿轮切去 120° 轮齿部分而形成的不完全齿轮。而且正扫驱动轴和回扫驱动轴之间存在一变速齿轮组件来实现正、回扫驱动轮 1:2 的速比关系。由于回扫驱动轮转速为正扫驱动轮的 2 倍,因此,当正扫驱动轮带动反射镜驱动轮以 ω 角速度转过 120° 正扫行程时,回扫驱动轮刚好转过 240° 无齿部分,此时正扫驱动轮和反射镜驱动轮脱离,而回扫驱动轮与反射镜驱动轮刚好进入啮合状态使反射镜反向转动。当回扫驱动轮以 -2ω 角速度驱动反射镜驱动轮转过 120° 回扫行程时,正扫驱动轮刚好转过 60° 无齿部分,系统进入下一扫描周期。

一个扫描周期中反射镜驱动轮总存在 $\omega \rightarrow 0 \rightarrow -2\omega$ 和 $-2\omega \rightarrow 0 \rightarrow \omega$ 速度变化过程。因此,为了实现反射镜驱动轮平稳换向,需要在关键系统参数理

论分析的基础上,对正、回扫驱动轮有齿区段的始末端进行修正,并给反射镜驱动轮增加弹簧阻尼元件。这会给系统设计带来以下三方面的益处:

(1) 扫描过程中,反射镜处于弹簧和驱动元件一对反作用力矩的共同作用下运转,可有效消除齿轮间隙,有利于确保系统传动精度;

(2) 在变速换向过程中,可充分利用弹簧的弹性势能,从而减小驱动电机输出力矩要求;

(3) 通过对弹簧元件的刚度和阻尼进行合理设计,理论上可实现反射镜驱动轮与正、回扫驱动轮的零速差啮合,从而可大大降低换向过程中产生的速度冲击。

2 扫描反射镜模型

2.1 扫描过程分析

反射镜的实际运动形式是绕定轴摆动,为方便理论分析,建立了如图 2 所示的扫描过程等效分析模型。

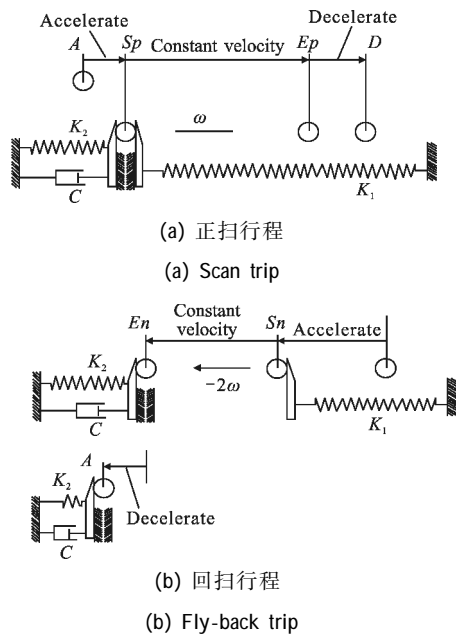


图 2 反射镜运动过程分析模型

Fig.2 Scan cycle analysis model

如图 2(a)所示,假设 A 点为正扫行程的初始速度零位,反射镜在弹簧 K_2 和阻尼 C 的作用下,从 A 点经过加速到达正扫匀速段起点 S_p 。此时反射镜速度为 ω 、弹簧 K_1 处于自由状态、弹簧 K_2 和阻尼器 C 达到平衡位置。正扫驱动轮与反射镜驱动轮进入啮合状态,带动反射镜以角速度 ω 做正向匀速扫描,驱动元件同时对弹簧 K_1 做功使其蓄能。当反射镜到达

正扫匀速段末点 E_p 时,正扫驱动轮进入非啮合状态,而此时反向驱动轮还未进入啮合状态。反射镜在弹簧 K_1 的作用下经减速而达到正扫行程末点 D ,正扫行程结束。

如图 2(b)所示,反射镜在弹簧 K_1 的作用下从正扫行程末点 D 经过加速到达回扫行程匀速段起点 S_n 时,反射镜速度到达 -2ω ,此时回扫驱动轮和反射镜驱动轮恰好进入啮合状态,带动反射镜以角速度做反向匀速扫描,而到达回扫匀速段末点 E_n 。假设 E_n 与正向匀速段起点 S_p 处于同一位置。此时,反射镜在弹簧 K_2 和阻尼 C 的作用下经减速到达正扫行程速度零位点 A ,然后进入下一轮回扫描行程。

从上述分析可看出,正反向匀速扫描行程中反射镜是在弹簧 K_1 和驱动元件的共同作用下运动,反射镜驱动轮处于理论零间隙工作状态,系统传动精度得到了保障。此外,系统主要依靠弹性元件的储能实现变速换向,降低了系统对驱动元件输出力矩的要求,同时控制系统的设计难度也会有所降低。

2.2 系统参数分析

若要把握反射镜每一时刻的位置和状态。需要对以下关键系统参数进行分析和设计: k_1 为弹簧 K_1 的刚度系数; k_2 为弹簧 K_2 的刚度系数; c 为阻尼 C 的阻尼系数。

为方便分析计算,提出如下假设条件:

(1) 弹簧 K_1 、 K_2 和阻尼 C 均为线性元件;(2) 各轴系理论光滑。

2.2.1 正扫行程

当反射镜经历正扫匀速段 $\overrightarrow{S_p E_p}$ 和减速段 $\overrightarrow{E_p D}$ 时,弹簧 K_1 经历了从零到最大伸长状态的变化过程。因此,弹簧 K_1 最大伸长量 θ_1 有如下表达式:

$$\theta_1 = \theta_p + \theta_{dp} \quad (1)$$

式中: θ_p 为正扫匀速段角行程; θ_{dp} 为正扫减速段角行程。

在正扫减速段 $\overrightarrow{E_p D}$,弹簧 K_1 对反射镜做负功,其动能转化为弹簧 K_1 的势能,由能量守恒定理可得:

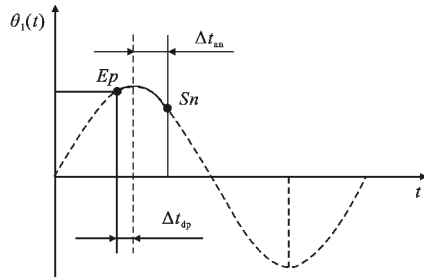
$$\frac{1}{2} J \omega^2 + \frac{1}{2} k_1 \cdot \theta_p^2 = \frac{1}{2} k_1 \cdot \theta_1^2 \quad (2)$$

式中: J 为反射镜的转动惯量; ω 为正扫匀速段的角速度。

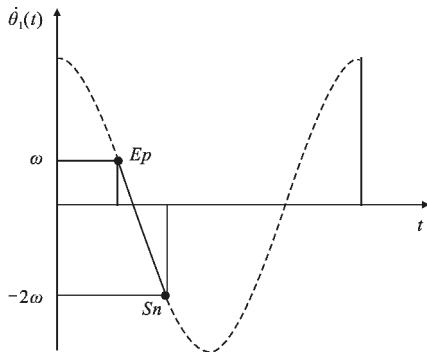
通过公式(2)可得弹簧 K_1 的最大伸长量 θ_1 有如下表达式:

$$\Theta_1 = \sqrt{\frac{J\omega^2}{k_1} \theta_p^2} \quad (3)$$

正扫减速段 \overrightarrow{EpD} 和回扫加速段 \overrightarrow{DSn} 过程中, 反射镜和弹簧 K_1 构成了一个典型的无阻尼扭振系统。其运动规律可按公式(4)、(5)进行描述, 存在如图 3 所示的角位移和速度变化规律。



(a) 角位移随时间变化曲线
(a) Angle displacement vs time



(b) 角速度随时间变化曲线
(b) Angular velocity vs time

图 3 单自由度扭振系统运动规律曲线

Fig.3 Motion scheme of single DOF spring-mass system

$$\theta_1(t) = \sqrt{\frac{J\omega^2}{k_1} \theta_p^2} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k_1}{J}} \cdot t\right) \quad (4)$$

$$\dot{\theta}_1(t) = \sqrt{\frac{J\omega^2}{k_1} \theta_p^2} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k_1}{J}} \cdot t\right) \quad (5)$$

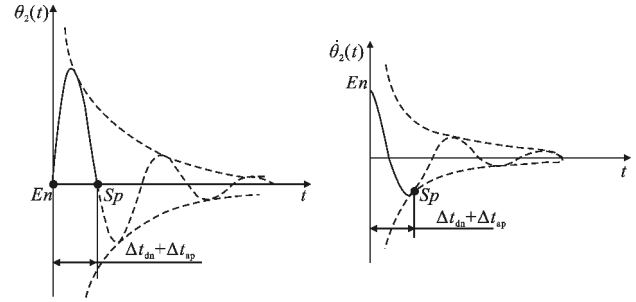
式中: $\theta_1(t)$ 和 $\dot{\theta}_1(t)$ 分别为位移和速度函数。

公式(5)是一个含有待求量 k_1 和自变量时间 t 的超越方程, 只能通过仿真手段或数值方法进行求解。求解该方程时, 回扫匀速段 \overrightarrow{SpEp} 的角速度是已知量, 还需要通过限定回扫加速时间历程 Δt_{an} 来求解 k_1 。进而结合公式(3)、(1)分别对弹簧 K_1 的最大伸长量 Θ_1 和正扫减速段角行程 θ_{ap} 进行求解。最后结合公式(4)对回扫加速段角行程 θ_{an} 进行求解。

2.2.2 回扫行程

假设回扫匀速段末点 En 与正扫匀速段起点 Sp

在同一位置。当反射镜从 En 点以 -2ω 减速到正向速度零位 A , 进而以 ω 速度到达 Sp 时, 弹簧 K_2 势能变化为零, 系统动能变化需要靠阻尼 C 来耗散。由于这一过程反射镜仅在弹簧 K_2 和阻尼 C 的作用下运动, 系统可视为如图 4 所示的指数衰减单自由度扭振模



(a) 角位移随时间变化曲线 (b) 角速度随时间变化曲线
(a) Angle displacement vs time (b) Angular velocity vs time

图 4 单自由度阻尼弹簧系统运动规律曲线

Fig.4 Motion scheme of single DOF spring-mass system with linear damper element

型, 其运动规律可按公式(6)、(7)进行描述:

$$\theta_2(t) = \Theta_2 e^{-nt} \sin(\omega_d t) \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_2(t) = \Theta_2 e^{-nt} [-n \sin(\omega_d t) + \omega_d \cos(\omega_d t)] \quad (7)$$

$$n = \frac{c}{2J} \quad (8)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - n^2} \quad (9)$$

式中: Θ_2 为系统的最大振幅, 与初始速度、位移、阻尼特性、系统频率有关; n 为系统阻尼和惯性比值的一半; ω_d 为考虑阻尼情况的系统振动频率。

结合图 4(a), 并按照文中所提出的扫描约束条件, 则存在如公式(10)(11)的关系:

$$\sqrt{\frac{k_2}{J} - \left(\frac{c}{2J}\right)^2} \cdot (\Delta t_{dn} + \Delta t_{ap}) = \pi \quad (10)$$

$$\frac{\dot{\theta}_2(\Delta t_{dn} + \Delta t_{ap})}{\dot{\theta}_2(0)} = \frac{e^{-\frac{c}{2J} \cdot (\Delta t_{dn} + \Delta t_{ap})}}{-1} = -\frac{1}{2} \quad (11)$$

公式(11)仅含有阻尼 c 一个待求量, 可通过限定回扫减速段 \overrightarrow{EnA} 到正扫加速段 \overrightarrow{ASp} 的时间历程和进行求解。然后可通过公式(10)对 k_2 进行求解, 进而可分别对回扫减速段 \overrightarrow{EnA} 到正扫加速段 \overrightarrow{ASp} 的角行程 θ_{dn} 、 θ_{ap} 以及时间历程 Δt_{dn} 、 Δt_{ap} 进行求解。

2.3 电机输出力矩

正扫匀速段 \overrightarrow{SpEp} 和回扫匀速段 \overrightarrow{SnEn} , 弹簧 K_1

的反作用力矩和电机输出力矩要形成平衡关系,这是保证匀速转动的关键所在。但是由于电机的输出力矩在以上两个时段是通过两个不同的传递路径作用于反射镜驱动轮。因此,就文中模型而言,对于同样反射镜角位置,回扫匀速段所需的电机输出力矩 2 倍于正扫匀速段。因此,电机的输出力矩应按图 5 变化趋势进行设计。正扫匀速段末点 E_p 到回扫匀速段始点 S_n 这一时间段是电机输出力矩调整阶段,电机输出力矩主要取决于正、回扫驱动轮系运动状态的变化以及两轴系所受的阻力。

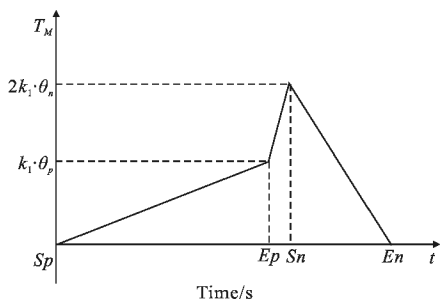


图 5 驱动电机输出力矩变化曲线

Fig.5 Output torque of the driving motor over time

3 模型仿真分析

3.1 模型参数

在理论建模基础上,利用多体动力学仿真分析软件对一具体算例进行了分析计算。已知参数约束条件如表 1 所示。

表 1 仿真分析模型约束条件

Tab.1 Constraints of the simulation model

Item	Denotation	Condition
Moment of inertia	J	13.936 kg · mm ²
Motion angle	θ_p	30°
Angular velocity of scan trip	ω	2 000 (°)/s
Time interval of retrace acceleration phase	Δt_{an}	0.001 s
Time interval of retrace deceleration phase and scan acceleration phase	$\Delta t_{dn} + \Delta t_{ap}$	0.001 5 s

3.2 仿真结果分析

3.2.1 扫描行程规律

该系统的扫描规律如图 6 所示,扫描周期为 0.025 1 s(合 39.8 Hz),正扫行程耗时 0.016 6 s,约占整个扫描周期的 2/3。从图中可看出一个扫描周期的绝大部分时段,由于反射镜在驱动元件和弹簧元件

的共同下匀速转动,且驱动元件的输出力矩和弹性元件的反作用力矩形成平衡关系。因此,匀速扫描时段驱动元件的输出力矩与角行程呈线性关系。此外,反射镜变速换向过程中,弹性元件的储能起主导作用,驱动元件的输出力矩需求很小。

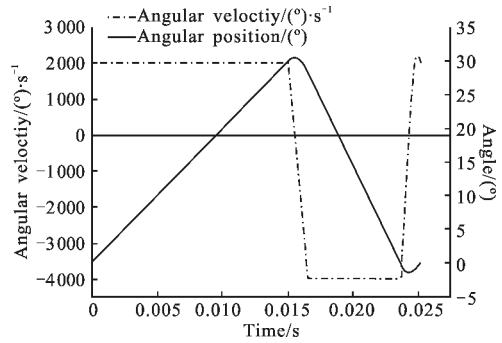
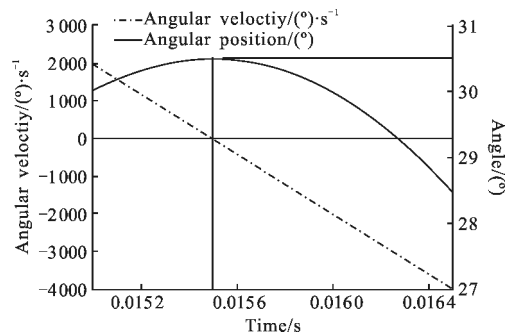


图 6 反射镜系统的扫描行程曲线

Fig.6 Scheme of the scanning system

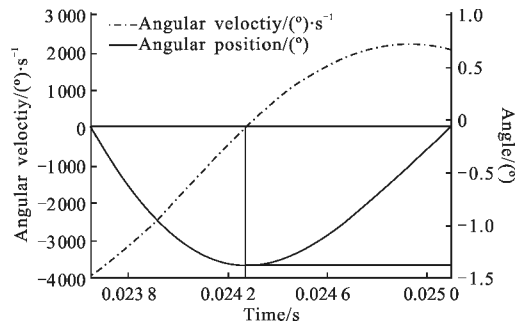
3.2.2 变速阶段

系统正反向加速减速过程耗时分别为 0.001 s 和 0.000 5 s,行程规律如图 7 所示。从图 7(a)中的变



(a) 正扫减速和回扫加速相位

(a) Scan deceleration phase and retrace acceleration phase



(b) 回扫减速和正向加速相位

(b) Retrace deceleration phase and scan acceleration phase

图 7 变速过程行程曲线

Fig.7 Angular position and angular velocity curve in the rotational direction change phase

化趋势可看出,正扫减速到回扫加速过程中,由于角位移变化很小(约 2°),原本呈余弦变化规律的速度曲线非常接近线性趋势。而在反向减速到正向加速过程中见图 7(b),系统的最大角位移量也不大(约 1.38°),但由于阻尼 C 的存在,系统的速度呈现出较为明显的非线性变化趋势。

4 探讨与思考

在关键系统参数精确设计的前提下,足够的轮系加工精度和系统装调精度是该系统能够顺利工程化实施的又一所必需的重要保障条件。从原理上来看,在正扫匀速段和回扫匀速段,整个系统是在预紧状态下运转,不存在齿轮间隙,齿轮的啮合精度是有所保证的。

由于在正反向切换过程中,反射镜驱动轮与正、回扫驱动轮几乎都不处于啮合状态,因此,反射镜驱动轮的运动状态改变所带来的速度冲击主要作用于弹簧 K_1 ,对正扫和回扫驱动轮影响甚小。然而,这一时段中,正、回扫驱动轮运动状态的变化与驱动电机输出力矩的变化密切相关。理论上讲,要使正、回扫驱动轮仍保持各自速度匀速转动,电机的输出力矩在正扫匀速段末点 E_p 处应瞬间变为零。但这对系统设计来说是不允许的,因为要保证反射镜驱动轮在匀速回扫起点 S_n 处的力矩平衡,电机的输出力矩在这一时段应继续增大。因此,若不对正、回扫驱动轮采取制动措施,电机的输出力矩就会使正、回扫驱动轮加速,进而会在回扫匀速段起点 S_n 处对反射镜驱动轮产生速度冲击。下面从系统动量矩变化的角度对换向过程的速度冲击进行分析,以动量矩的变化量作为系统冲击的评判指标。这一时段系统动量矩的变化量可按下式进行描述。

$$L = \sum T_i \cdot (\Delta t_{op} + \Delta t_{an}) = J_E \cdot \Delta \omega_M \quad (12)$$

式中: $\sum T_i$ 为合力矩(包括电机的输出力矩、轴系摩擦力矩等); J_E 为折合到电机输出轴上的等效转动惯量。与正、回扫驱动轮系以及两轴间过渡轮系的转动惯量相关; $\Delta \omega_M$ 为电机输出轴转速的变化量。

从上述分析可看出,在正、回扫换向时间一定的条件下,减小合力矩 $\sum T_i$ 是减小换向过程系统速度冲击的根本所在。因此,具体工程实施时可通过在正、回扫驱动轮系上增加周期性阻尼元件的方法来削弱正反向切换过程中的速度冲击。通过两轴系阻尼参数的合理化配置,可使系统的速度冲击降到最低程度。

5 结论

提出了一种正反向 1:2 速比扫描模式的单向驱动往复扫描反射镜系统模型,通过采用不完全齿换向机构和弹簧阻尼元件,该系统在驱动元件不换向前提下可实现反射镜正反转不同速平稳切换。

算例分析表明,通过弹簧阻尼元件的合理设计和驱动轮齿修正,该系统不仅可以实现正扫回扫时间 2:1 的扫描关系,而且可大大减小换向过程中的速度冲击。与传统的直驱式单面扫描反射镜系统相比,该系统可提高扫描行程中的时间利用率,降低了系统设计难度和驱动元件性能要求,在提高扫描速度方面具有较大优势。该模型在轻小化、大行程、高精度光学扫描系统研制方面具有较大的开发应用潜力。

参考文献:

- [1] Perkes D W, Jensen G L, Higham D L. Steering and positioning targets for HWIL IR testing at cryogenic conditions[C]//SPIE, 2006, 6208: 62080C.
- [2] Zhang Dawei, Liu Zhi, Yang Yang, et al. 3D laser scanning technology based on right-angle reflection mode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 443-447. (in Chinese)
- [3] Li Hui, Li Zhi, Hu Xin, et al. Dynamic simulation and control error analysis of two-dimensional reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1916-1921. (in Chinese)
- [4] Kluk Daniel J, Boulet Michael T, Trumper David L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, (22): 257-270.
- [5] Xiang Sihua, Chen Sihai, Wu Xin, et al. Study on fast linear scanning for a new laser scanner [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, (42): 42-46.
- [6] Lu Yafei, Fan Dapeng, Fan Shixun, et al. Design of two axis elastic support for fast steering mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2574-2581. (in Chinese)
- [7] Wu Xin. Research on high-performance fast steering Mirror [D]. Wuhan: Huazhong University of Science&Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] Hu Chunsheng. Investigation into the high-speed pulsed laser diode 3D-imaging lidar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [9] Davis Lange, William Abrams, Mrinal Iyengar, et al. The goodrich DB - 110 system: multi-band operation today and tomorrow[C]//SPIE, 2003, 5109: 22-35.
- [10] Xu Guangzhou, Ruan Ping, Li Fu, et al. Design and simulation of tilt mirror for space image stabilized system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 958-965. (in Chinese)