

文章编号 1004-924X(2007)05-0746-07

摆式陀螺寻北仪的积分测量方法

王 镇, 申功勋

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘要:提出了摆式陀螺寻北仪二次积分测量方法。在粗寻北阶段采用步进法,通过施加外作用消耗系统原有机械能的方式实现快速寻北。在精寻北阶段采用二次光电积分法,通过对陀螺摆动的一个半周期做积分测量后,利用二次光电积分的方式得到陀螺摆动的平衡位置,然后,通过计算来获得子午面与陀螺轴向之间的夹角。进行了一系列相关实验,结果表明:二次光电积分法有效地改善了JT15试验样机的寻北测量精度,使由于测量周期变化造成的寻北误差减小了10倍以上。本方案缩短了摆式陀螺寻北仪的寻北测量时间,提高了寻北测量精度,满足了工程实用的精度和快速性要求。

关键词:摆式陀螺;寻北;步进法;二次光电积分法

中图分类号:V241.5 文献标识码:A

Investigation on integral method of pendulous gyroscope

WANG Zhen, SHEN Gong-xun

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: An improved integral measuring method of pendulous gyroscope is developed to shorten the north seeking time and improve the measuring precision. On the rough north seeking stage, a step move method that is to consume the mechanical energy of gyroscopic pendulum by the outer action is used to realize the fast north seeking, and then, on the precise north seeking stage, a double photoelectric integral method is adopted to get the intersecting angle between the meridian plane and the reference axis of gyro. The double photoelectric integral method gets the equilibrium position of gyro swing by one and a half periods integral calculating of measuring data and then makes use of the formula to compute the intersecting angle. The experimental results show that the double photoelectric integral method can effectively improve the measuring precision and decrease the integral error of measuring period variety; the integral error is less than one of tenth that in the traditional photoelectric integral method; and the scheme satisfies the engineering requirement of accuracy and speediness basically.

Key words: pendulous gyroscope, north seeking, step move method, double photoelectric integral method

1 引 言

陀螺寻北仪是一种能在静基座上全天候自动指示方位的高精度惯性仪表,广泛应用于测绘、矿山、隧道、军事、航空、航天等领域,它依靠惯性元件敏感地球自转角速率水平分量的特性来完成寻北功能。近年来,随着现代科技的发展,陀螺的品种不断增多,如光纤式陀螺、激光式陀螺等^[1-3],但由于种种原因,采用新式陀螺的寻北仪在精度和适应环境能力方面往往不及传统的机械光学式陀螺寻北仪。

在机械光学式陀螺寻北仪中使用最多、精度较高的是摆式陀螺寻北仪,但摆式陀螺寻北仪的寻北时间相对比较长,且容易受外部干扰影响,在测量的快速性与精度上存在着一定的矛盾,严重制约着其大量应用。目前,摆式陀螺寻北仪的寻北测量时间均在 15 min 以上,且测量精度很难控制在 $10''$ 以内。工程实际中,其测量精度还会因测量环境的变化而有所降低,有时甚至会变化到 $1'$ 以上。综上所述,对于当前的摆式陀螺寻北仪仅采用一种寻北方法是难于同时满足这两项性能指标要求的。

为了进一步缩短摆式陀螺寻北仪的寻北测量时间,提高其寻北测量精度,人们在精寻北阶段采用了积分测量方法,但传统的积分测量方法对定时周期要求相对准确(定时误差小于 0.01 s)。实际应用中,测量地点纬度相对仪器常数标定地点的纬度变化、测量环境温度的变化、重力场的变化等都会造成测量周期的变化。因而,实际中无论采用哪种周期测量法都很难得到准确的周期值。测量周期的变化直接地影响了积分值的准确性,给测量结果带入了较大的误差,限制了其在摆式陀螺寻北仪中的应用。

为此,本文提出了一种改进型积分测量方法,这种方法能够有效地解决传统积分法中存在的问题,且能够有效地抑制各种周期性高频干扰信号。

2 积分测量法的基本工作原理

摆式陀螺寻北仪是用一根恒弹性吊丝将陀螺壳体悬挂在空间,从而构成一个质心下移的陀螺组件,如图 1 所示。

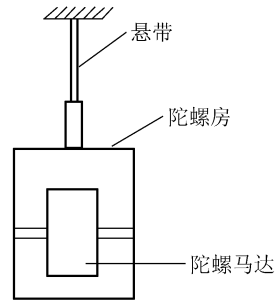


图 1 摆式陀螺寻北仪简图

Fig. 1 Sketch figure of pendulous gyroscope

由于质心下移,使绕下挂点转动的陀螺组件产生一重力矩,在这一重力矩作用下,陀螺组件发生进动,使陀螺转子轴在空间相对于子午线摆动,其轨迹是一椭圆,椭圆短轴与长轴相比非常小,一般无法测量绕水平轴转动的转角,只能测量到对称子午线的摆动角。在考虑阻尼作用时,陀螺摆在子午线附近的水平方向运动方程为:

$$\alpha = A \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

式中: A —陀螺摆动的摆幅; T —陀螺摆动的不受扭周期; λ —阻尼系数; t —陀螺摆动时间;由于 λ 很小,因此,一般在讨论中,假设 $\lambda \approx 0$ 。

由式(1)可知,陀螺在不受扭力矩作用时,摆动的平衡位置与真北重合,当悬带扭力矩的作用存在时,陀螺摆动的平衡位置和真北存在着如图 2 所示的确定关系。图中: N 为真北方向, R 为陀螺摆动的平衡位置, B 为悬带扭力零位, O 为陀螺敏感元件的悬挂点。

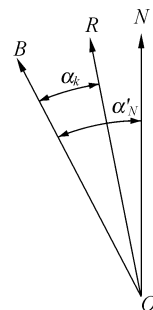


图 2 摆动平衡位置与真北的角度示意图

Fig. 2 Intersecting angle between the equilibrium position of gyro swing and the meridian plane

陀螺摆动的平衡位置 R 是在弹性扭力矩与陀螺指北力矩的共同作用下产生的, 这样可得到力矩平衡方程:

$$\alpha_k D_B = (\alpha_N' - \alpha_k) D_k, \quad (2)$$

式中 D_B —悬带的扭力矩系数; D_k —陀螺指北力矩系数; α_k —悬带扭力零位与陀螺平衡位置之间的夹角; α_N' —悬带扭力零位与真北之间的夹角。

上式中 D_k 与陀螺的角动量 H 、测站纬度 φ 以及地球自转角速度 ω_e 之间有如下关系:

$$D_k = H\omega_e \cos \varphi, \quad (3)$$

变换式(2)得: $\alpha_k = \frac{D_k}{D_B} (\alpha_N' - \alpha_k)$, 令: $x = \frac{D_k}{D_B}$, 则有:

$$\alpha_N' = \alpha_k \frac{1+x}{x}. \quad (4)$$

由式(4)即可推算出真北。

3 粗寻北一步进法

方程式(4)在小角度的条件下成立, 所以, 在寻北的初始阶段采用“步进法”。步进法的核心是利用外作用减小系统原有机能。其原理为: 如果某一时刻, 悬带扭力零位与陀螺摆摆动的逆转点重合, 这时, 悬带不受扭, 弹性位能为零, 但此时扭力零位偏北, 陀螺摆受指北力矩作用, 而具有指向位能; 当陀螺摆继续运动半个周期后, 到达另一逆转点, 由于扭力零位还在前一个逆转点位置, 悬带受扭, 弹性位能最大, 此时将悬带零位转至这一逆转点, 则弹性位能变为零; 这时新位置的指北位能的绝对值小于前一位置, 即扭力零位向真北逼近了, 当重复这一过程数次后, 陀螺摆的摆幅减小, 扭力零位逼近真北。

通过试验与理论分析, 可以得出如下结论:

(1) 当 $x=1$ 或接近于 1 时, 半周期步进一次将使悬带扭力零位停在真北附近, 如图 3 所示。

(2) 当 $x>1$ 时, 步进将在偏北一方多次进行, 步进次数与 x 值及摆的初始状态有关, 如图 4 所示。

(3) 当 $x<1$ 时, 步进将在真北左右摆动进行, 步进次数与 x 值及摆的初始状态有关, 如图 5 所示。

以上是按半周期进行步进的, 当选择 x 值较大时, 一般采用 $1/4$ 周期步进一次的方法, 结果也

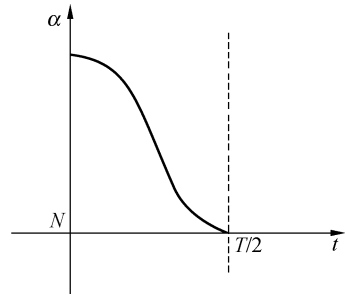


图 3 $x=1$ 时步进运动示意图

Fig. 3 Step motion while $x=1$

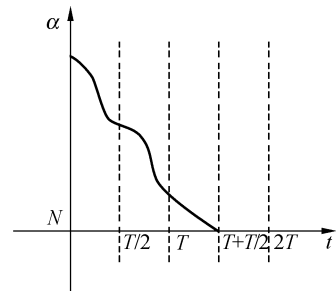


图 4 $x>1$ 时步进运动示意图

Fig. 4 Step motion while $x>1$

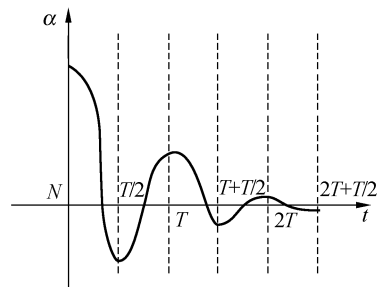


图 5 $x<1$ 时步进运动示意图

Fig. 5 Step motion while $x<1$

比较理想。

4 精寻北—双次光电积分法

4.1 原理

当采用步进法概略定北以后, 开始精密陀螺定北, 根据式(4)的基本原理, 采用光电积分法, 其原理如图 6 所示。摆式陀螺寻北仪的运动方程可以用如下函数描述:

$$\alpha(t) = \alpha_k + A \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (5)$$

其中: A —摆动的振幅; T —受扭摆动周期;从任一时刻 t_0 起对 $\alpha(t)$ 进行一个周期的积分:

$$S = \int_{t_0}^{t_0+T} (\alpha_k + A \sin \frac{2\pi t}{T}) dt = \alpha_k T$$

得:

$$\alpha_k = \frac{S}{T} \quad (6)$$

可见,通过一个整周期的积分测量后,可得到摆动的平衡位置,即扭力零位与陀螺平衡位置之间的夹角 α_k 。但是,这种传统的积分测量方法对定时周期的测量要求很高,而实际应用时很难满足这一条件。

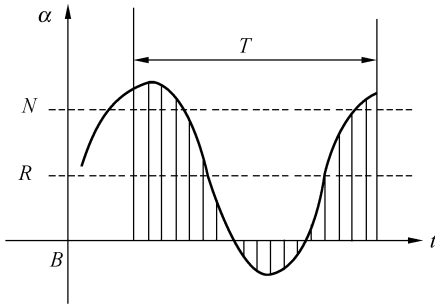


图6 光电积分法原理图

Fig. 6 Principle of photoelectric integral method

为了解决这一矛盾,本文采用了双光光电积分法,其数学表达式为:

$$2S = \int_{t_0}^{t_0+T_m+\Delta T} (\alpha_k + A \sin \frac{2\pi t}{T_m}) dt + \int_{t_0+\frac{T_m+\Delta T}{2}}^{t_0+\frac{T_m+\Delta T}{2}+T_m+\Delta T} (\alpha_k + A \sin \frac{2\pi t}{T_m}) dt \quad (7)$$

式中: $T_m + \Delta T$ 为实际给定周期,或实际测量的周期,展开后为:

$$2S = 2\alpha_k (T_m + \Delta T) - A \frac{T_m}{2\pi} \cos \frac{2\pi t}{T_m} \Big|_{t_0}^{t_0+T_m+\Delta T} - A \frac{T_m}{2\pi} \cos \frac{2\pi t}{T_m} \Big|_{t_0+\frac{T_m+\Delta T}{2}}^{t_0+\frac{T_m+\Delta T}{2}+T_m+\Delta T}$$

当陀螺摆收敛到真北附近时,摆幅很小,且:

$$T_m \geq 100 \text{ s}, \Delta T \leq 0.1 \text{ s},$$

则上式可简化为:

$$2S \approx 2\alpha_k (T_m + \Delta T) \quad (8)$$

上述方法能有效地减小积分测量误差,且能很好地消除陀螺摆摆动频率偶数倍的低频干扰。这一方法也可用于抗周期性干扰的采样系统中。

4.2 仿真

下面对上面所提出的双光光电积分法进行仿真分析。

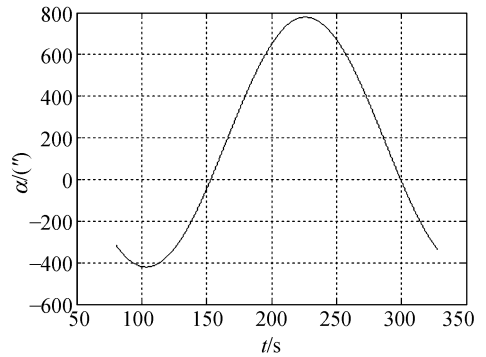


图7 双光光电积分法仿真图(一)

Fig. 7 Emulation graph of double photoelectric integral method (I)

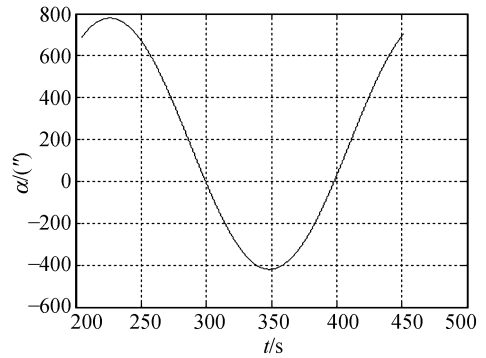


图8 双光光电积分法仿真图(二)

Fig. 8 Emulation graph of double photoelectric integral method (II)

假定将陀螺摆收敛到距离真北 $3'$ 左右的小角度内,摆幅收敛到 $10'$ 左右,假设平衡位置为:

$$\alpha_k = \frac{8.73}{10\,000} \times \frac{180}{\pi} \times 3\,600 = 180.069 \text{ } 2''$$

$t_0 = 80 \text{ s}$, 周期为 245 s , 计时误差 $\Delta t = 3 \text{ s}$, 数据采样时间为 10 ms , 则由式(5)可得:

$$\alpha(t) = \frac{8.73}{10\,000} + \frac{8.73}{3\,000} \sin \frac{2\pi t}{245}$$

积分后得到的平衡位置为:

一次积分: $173.960 \text{ } 2''$;

二次积分: $180.142 \text{ } 3''$;

积分结果与真值的偏差为:

一次积分结果与真值的偏差为:

$$180.069 \text{ } 2'' - 173.960 \text{ } 2'' = 6.109'';$$

二次积分结果与真值的偏差为:

$180.142\ 3'' - 180.069\ 2'' = 0.073\ 1''$;

仿真曲线如图 7、图 8 所示。

同理可得计时误差: $\Delta t = 1\ \text{s}, 2\ \text{s}, 4\ \text{s}, 6\ \text{s}$ 时的积分结果, 如表 1 所示。

表 1 传统光电积分法与双次光电积分法的仿真结果对比表

Tab. 1 Comparison of emulation results between the traditional photoelectric integral method and the double photoelectric integral method

计时误差	积分得平衡位置	积分结果与真值的偏差
$\Delta t = 1\ \text{s}$	一次积分	178.050 3''
	双次积分	180.077 9''
$\Delta t = 2\ \text{s}$	一次积分	176.013 5''
	双次积分	180.102 8''
$\Delta t = 4\ \text{s}$	一次积分	171.892 0''
	双次积分	180.194 6''
$\Delta t = 6\ \text{s}$	一次积分	167.717 3''
	双次积分	180.330 4''

对应的误差曲线如图 9、图 10 所示。

从上述仿真结果可以看出, 理论上, 应用了双次光电积分法后, 使测量误差降低了几十倍。由此可见, 双次光电积分法能够有效地缩减由于积分周期变化所造成的寻北测量误差。

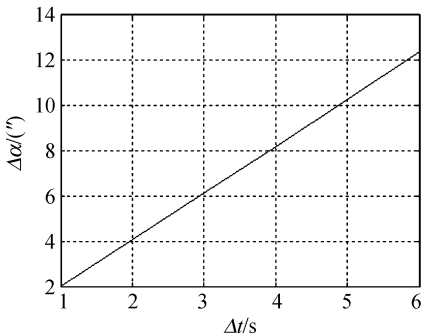


图 9 传统积分法的误差曲线图

Fig. 9 Error graph of traditional photoelectric integral method

5 工程实现方法

5.1 观测程序

(1) 仪器在观测点上架设整平后, 用积分法测陀螺马达启动前的扭力零位, 得积分值 S_0 ;

(2) 在陀螺马达启动稳定后, 释放陀螺敏感

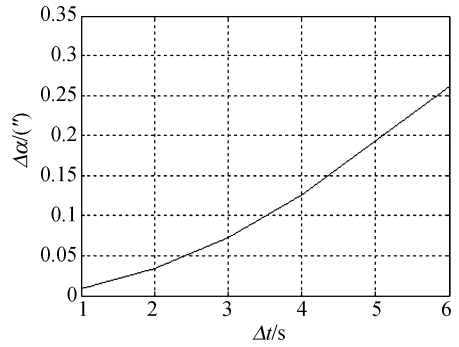


图 10 双次光电积分法的误差曲线图

Fig. 10 Error graph of double photoelectric integral method

元件, 并通过零位跟踪方式, 获得第一个逆转点, 并停止跟踪;

(3) 在停止跟踪 $T/2$ 后, 将悬带零位与陀螺主轴对准, 即用步进概略定向法, 直至摆幅较小;

(4) 通过光电积分法记录摆动积分值 S ;

(5) 如果马达有温升, 需做测后零位;

(6) 用准直望远镜测定预定的目标, 读取度盘读数;

则: 真北 α_N :

$$\alpha_N = \alpha_\theta \pm \left(\frac{S}{T} - \frac{S_0}{T_0} \right) \frac{(1+x)/x}{k}, \quad (9)$$

(如果取 $S_0 = 0$, 即不用测前零位也可实现)

式中: α_θ —最终悬带零位所在的方位; x —比例系数; k —光电、模数转换的刻度系数; T —马达启动状态下的受扭摆动周期; T_0 —马达静止时的受扭摆动周期。

5.2 参数确定

在观测之前, 需知陀螺马达不启动时的自由扭摆周期 T_0 , 陀螺启动后的受扭摆动周期 T 。自由扭摆周期的大小取决于陀螺敏感元件本身, 而陀螺马达启动后的受扭摆动周期不仅取决于陀螺敏感元件本身, 而且也取决于测试点的纬度。假设在纬度 φ_1 处, 周期为 T_1 , 则在纬度 φ 处:

$$T_\varphi = T_1 \sqrt{\frac{(1+x) \cos \varphi_1}{x_1 \cos \varphi + \cos \varphi_1}}, \quad (10)$$

式(9)中 x 的标定按下式计算:

$$x = \frac{T_{\text{不受扭}}^2}{T_{\text{受扭}}^2} - 1, \quad (11)$$

刻度当量 k 的标定方式:

要求在光敏元件、光路、电器元件不变的条件下进行:

(1) 在光敏元件工作区,借助经纬仪装角,以不同悬带零位进行积分;

(2) 设每次转动角一致,为 $\Delta\theta$,以相邻两积分值方差取绝对值运算,即 $\bar{d}_i = |d_i - d_{i+1}|$;

$$(3) \text{ 求出平均差值量: } \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n};$$

$$(4) \text{ 计算 } k: k = \frac{\bar{d}}{T \cdot \Delta\theta} \quad (12)$$

5.3 计算程序

(1) 按公式(10)计算所在测点的周期;

(2) x_φ 的计算按下式:

设在纬度 φ_1 处,由式(11)计算出 x_1 ,则:

$$x_\varphi = \frac{x_1 \cos \varphi_1}{\cos \varphi}, \quad (13)$$

(3) 真北的计算:

$$\alpha_N = \alpha_\theta \pm \left(\frac{S}{T} - \frac{S_0}{T_0} \right) \frac{(1+x)/x}{k}$$

(4) 根据有关条件,给测量结果加入修正,即:

$$\alpha_N = \alpha_N + \Delta\alpha_{k\theta}, \quad (14)$$

式中 $\Delta\alpha_{k\theta}$ 为计算修正量;

综上所述得:

$$\alpha_N = \alpha_\theta \pm \left[S / \left(T_1 \sqrt{\frac{(1+x) \cos \varphi_1}{x_1 \cos \varphi + \cos \varphi_1}} \right) - S_0 / T_0 \right] \frac{\left(1 + \frac{x_1 \cos \varphi_1}{\cos \varphi} \right) / \frac{x_1 \cos \varphi_1}{\cos \varphi}}{k} + \Delta\alpha_{k\theta}, \quad (15)$$

5.4 试验验证

在试验室常温条件下,传统积分测量法应用在中低精度的 JT15 上,其寻北测量精度可达到 $15''$ 左右,如表 2 所示的测量结果,其精度为: $14.8''$,但是,在实用的测量条件下,存在着纬度的变化、温度的变化、重力加速度的变化以及测量点地基震动等干扰因素,这些因素影响了测量周期的准确性。由于测量周期存在偏差,致使其寻北结果变化很大,一般情况下变化几十角秒,严重时甚至变化了 $1'$ 左右,极大地影响了其寻北测量的可靠性。

现利用上面所述的二次光电积分法,同样在 JT15 上搭载试验系统,在相同的实用环境下测量,得到其测量结果如表 3 所示,测量精度为 $15.8''$,其寻北结果仅变化了 $1''$ 。

表 2 试验室条件下传统光电积分法的试验数据及结果

Tab. 2 Data and results obtained by traditional photoelectric integral method in laboratory

序号	角度
1	359°54'19"
2	359°54'15"
3	359°53'48"
4	359°54'20"
5	359°54'06"
6	359°53'48"
平均值	359°54'06"
标准差	14.8"
寻北时间	20 min

表 3 实用环境下二次光电积分法的试验数据及结果

Tab. 3 Data and results obtained by double photoelectric integral method in practical environment

序号	角度
1	359°54'11"
2	359°53'44"
3	359°54'4"
4	359°53'45"
5	359°54'25"
6	359°54'7"
平均值	359°54'3"
标准差	15.8"
寻北时间	24 min

可见,应用了二次光电积分法后,有效地克服了测量周期变化造成的影响,改善了 JT15 试验样机的寻北测量精度,如果将上述方法应用在较高精度的 TDJ-83 上,则还会得到更好的寻北测量结果。

6 结 论

本文针对摆式陀螺寻北仪存在的普遍问题,即寻北精度与寻北的快速性之间的矛盾,提出了一种复合式寻北方法,即在粗寻北阶段采用步进法,在精寻北阶段采用二次光电积分法,试验结果表明:

(1) 步进法可快速地将陀螺摆收敛到真北附近,做小摆幅运动。

(2) 二次光电积分法在精确寻北测量中可较好地抑制环境振动产生的干扰。

(3) 与采用传统积分测量法的试验室常温条件下的试验结果相比,二次光电积分法在实用环

境下的测量误差可控制在 $3''$, 有效地减小了摆动周期变化造成的积分误差, 改善了 JT15 试验样机的寻北测量精度, 使其在适当损失快速性的前提下, 满足了工程应用的精度要求。

参考文献:

- [1] 刘武发, 龚振邦, 蒋蓁. 微型压电陶瓷棒角度速率陀螺设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 439-444.
LIU W F, GONG ZH B, JIANG ZH. Design of micro piezoelectric ceramic rod angular rate gyro [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 439-444. (in Chinese)
- [2] 蒋明, 杨福俊, 董萼良, 等. 基于高速摄像的双线性振动陀螺力学特性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 121-126.
JIANG M, YANG F J, DONG E L, *et al.*. Analysis of mechanical characteristics in the double linear vibratory gyroscope using high speed photography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 121-126. (in Chinese)
- [3] 韩邦成, 虎刚, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的优化设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 662-666.
HAN B CH, HU G, FANG J CH. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor [J]. *Optic and Precision Eng.*, 2006, 14(4): 662-666. (in Chinese)

作者简介: 王 缜(1962—), 男, 北京航空航天大学宇航学院精密仪器与机械专业博士研究生, 主要研究方向为快速初始方位对准技术。E-mail: Wangzhen15suo@sohu.com

(本栏目编辑 李树军)