

文章编号 1004-924X(2007)10-1509-06

三轴激光陀螺温度误差动态建模及补偿技术

葛文涛¹, 陈明刚², 林玉荣¹, 邓正隆¹

(1. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:提出了一种新的三轴激光陀螺温度误差动态建模及测试方案,并进行了实验。实验结果表明,新的动态模型能够在大变温率、大范围温变条件下陀螺的漂移进行有效补偿,且补偿后陀螺精度在全温度范围内优于 $0.05^\circ/\text{h}$ 。与静态模型相比,动态建模方法具有测试时间短、模型精度高及易于工程实现等优点。

关键词:环形激光陀螺;温度模型;误差补偿

中图分类号:V241.558 **文献标识码:**A

Dynamic modeling and compensation for thermal error of three-axis ring laser gyro

GE Wen-tao¹, CHEN Ming-gang², LIN Yu-rong¹, DENG Zheng-long¹

(1. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: A new dynamic modeling and testing scheme for the thermal error of three-axis ring laser gyro were presented. The experimental results show that the gyro drift under harsh working environment can be effectively compensated using the new dynamic model, the gyro error can be reduced below $0.05^\circ/\text{h}$. Compared with the static model, the dynamic one has advantages in a shorter test time, higher model accuracy and easier implementation.

Key words: ring laser gyro; temperature model; error compensation

1 引言

激光陀螺自身的优点使其成为了一种理想的惯性敏感器件^[1],人们通过不断地改良工艺^[2]促进了它的工程化实现,而激光陀螺对温度的敏感性^[3],又限制了它的应用范围。对激光陀螺温度误差模型加以辨识并用软件方法实时补偿已经成

为提高系统精度和稳定性的一个重要手段。

国外通过对惯性器件改进热设计^[4]及建立温度补偿系统^[5](Temperature Compensation System, TCS)等方法来减小系统的温度误差;国内在温度建模方面也做了大量的工作^[6-9],并取得了不错的效果。但针对三轴整体式激光陀螺在大变温率或大范围温变环境下性能改善的研究还未见报道。

收稿日期:2007-03-12;修订日期:2007-06-29.

基金项目:武器装备预研基金资助项目(No. 514090101HT0141)

本文结合系统实际应用背景,对采用机械抖动偏频技术的三轴整体式激光陀螺的温度特性进行了深入研究,利用带温箱的转台构建试验系统进行了大量高低温重复性试验,提出了一种温度误差动态建模及测试方案。为比较方便,本文对静态温度模型与动态温度模型做了对比研究。结果表明,静态模型对大变温率或大范围温变环境下陀螺性能的改善不显著,而动态模型补偿效果明显,且补偿后的陀螺在全温度范围内精度优于 $0.05^\circ/\text{h}$ 。此外,与传统的静态模型相比,动态建模方法具有测试时间短、模型精度高及易于工程实现等优点。

2 激光陀螺温度模型

温度对激光陀螺的影响主要表现在三个方面^[10]:温度变化、温度梯度和温度变化率。激光陀螺的温度实验通常需要进行静、动态两方面的测试,这里的静、动态是以环境温度是否变化来定义的。

2.1 坐标系及几点相关说明

三轴整体式激光陀螺内三个相互正交的陀螺测量轴 n_1, n_2, n_3 所形成的坐标系(简称通道轴坐标系)与陀螺仪基准坐标系(简称系统轴坐标系)不重合。陀螺沿三通道的输出 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 与沿系统轴 x, y, z 方向输出 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 之间的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, \mathbf{M} 为安装矩阵, \mathbf{M} 取值由于加工精度及安装误差等因素影响,并不等于其理论值,实际应用时需通过实验求取。

实验过程中系统轴为北天东方向,设 L 为当地纬度, ω_e 为地球自转角速率,则地球自转分量在通道轴向的输出为:

$$\begin{bmatrix} \omega_1^0 \\ \omega_2^0 \\ \omega_3^0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \omega_e^E = \mathbf{M}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \omega_e \cdot \cos L \\ \omega_e \cdot \sin L \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对三轴整体式激光陀螺而言,陀螺系统轴零偏是由陀螺三个通道轴向的零偏耦合产生,是一种等效零偏。因此对三轴激光陀螺的温度补偿选择在通道轴方向进行,但出于习惯,仍以其系统轴

向的输出特性来评价该陀螺的性能。

下文中温度补偿前后的实验数据均已扣除式(2)中所述地球自转分量的影响。

2.2 静态温度模型

激光陀螺的静态温度模型主要适用于工作时间相对较短,受温度梯度、温度变化速率影响较小的系统。因此静态试验建模方法着重考查不同的环境温度对系统精度的影响,忽略温度梯度、温度变化率等对陀螺性能的影响。它通过全温度标定实验^[6]对系统参数加以补偿,从而有效地提高系统性能。

静态温度实验测试方法的实现过程:选定多个温度点,并分别在各温度点下对该陀螺进行恒温测试,利用各温度点下测试数据对激光陀螺的温度误差基于最小二乘原理拟合建模。对激光陀螺 i 通道轴建立零偏温度模型为:

$$\text{output}_i = A_{i0} + A_{i1} \cdot t + A_{i2} \cdot t^2 + A_{i3} \cdot t^3 + e_i, \quad (3)$$

其中 $i=1\sim 3$, 分别对应三个通道轴; $t=t_i-t_0$, t 为以 t_0 为零点的温度标准, t_i 为陀螺内 i 通道处温度传感器的输出,选择 $t_0=25^\circ\text{C}$; $A_{i0}, A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}$ 分别为陀螺 i 通道轴零偏静态温度模型各项系数; e_i 为系统随机噪声。

为建立精确的温度误差模型,需要在激光陀螺全温度范围内选择尽可能多的温度点进行测试。静态测试方法实验周期长,耗费大量的人力物力,很难用于批量生产的激光陀螺;此外,利用静态温度模型,很难精确、全面地反映陀螺温度误差的动态变化规律,尤其对大范围温变或大变温率情况下温度误差的补偿效果较差。

2.3 动态温度模型

与静态温度模型相比,动态模型则更好地体现了陀螺内部及周边温度场的变化,真实反映了陀螺的温度特性。IEEE 标准^[9]定义单轴激光陀螺的温度梯度为沿陀螺敏感轴方向的温度差值。而对三轴整体式激光陀螺而言,此方向的温度梯度很难测试。故通过相关性分析,选择陀螺仪内某点为基点,定义该点与光学本体某通道轴间温度差为该通道轴的温度梯度,构建三轴激光陀螺 i 通道的零偏动态温度模型为:

$$\begin{aligned} \text{Bias}_i &= B_{i0} + k_i \times (t_i - t_{i0}) + p_i \times \\ &\Delta t_i + q_i \times (\dot{t}_i) + \epsilon_i, \end{aligned} \quad (4)$$

式中的第一项 B_{i0} 为陀螺 i 通道对应温度 t_{i0} 时的零偏值($i=1\sim 3$),单位: $(^\circ)/\text{h}$;第二项代表温度

变化对零偏的影响,其中 t_i 表示陀螺第 i 通道温度传感器的输出,单位: $^{\circ}\text{C}$, t_{i0} 为陀螺上电时第 i 通道温度传感器的初值, k_i 为第二项系数,单位: $(^{\circ})/\text{h}/^{\circ}\text{C}$;第三项表示温度梯度对零偏的影响, Δt_i 为第 i 通道的温度梯度, p_i 为第三项系数,单位: $(^{\circ})/\text{h}/^{\circ}\text{C}$;第四项表示温度变化速率对零偏的影响, \dot{t}_i 为陀螺第 i 通道温度传感器输出的变化率,单位: $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, q_i 为第四项系数,单位: $(^{\circ})/\text{h}/(^{\circ}\text{C}/\text{min})$; ϵ_i 表示由于温度传感器偏置误差及系统随机噪声等给模型带来的误差项。

由于激光陀螺的输出是数字量的非平稳随机过程,需经过适当的统计处理,去除野值,然后进行回归分析,从而估计出其具体的参数。若要进一步提高模型精度,可将式(4)模型加以改进:

$$\text{Bias}_i = B_{i0} + \sum_{j=1}^l k_{ij} \times (t_i - t_{i0})^j + \sum_{j=1}^m p_{ij} \times (\Delta t_i)^j + \sum_{j=1}^n q_{ij} \times (\dot{t}_i)^j + \epsilon_i. \quad (5)$$

式(5)中各项的定义与式(4)基本类似,第一项为相应温度的零偏值,而后三项依次代表温度变化、温度梯度及温度变化速率对零偏的影响, ϵ_i 表示由于温度传感器偏置误差及系统随机噪声等带给模型的误差项。可以看出式(4)为式(5)的一个简化形式。需要指出的是,系统温度模型的选取需要根据惯性器件自身的具体特性、系统的应用指标要求以及测试设备、测试环境等综合权衡。

基于工程实现等考虑,在本文以下的分析中,仍暂选用式(4)简化模型。实际的测试结果也证实,利用式(4)中模型进行温度补偿能够满足系统性能要求。

3 温度实验及结果分析

3.1 温度试验系统

三轴激光陀螺温度试验系统构成如图 1 所示,系统配有带温箱的双轴转台,其温度控制范围是 $-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$,温度分辨率为 0.1°C 。实验时,激光陀螺安放于转台上温箱中,陀螺仪信息通过系统 485 通讯接口输出,由工控机进行采集,采样周期取机械抖动整周期。

系统温度补偿流程如图 2 所示,对陀螺输出进行整周期采样,每 250 个机械抖动周期计算一次温度误差,进行补偿。

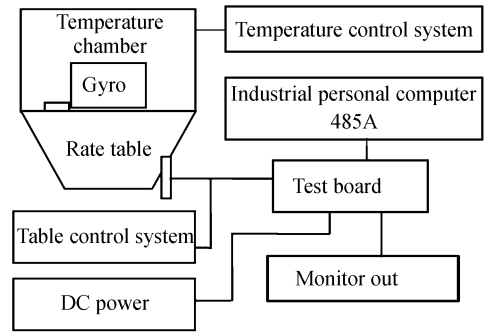


图 1 温度实验系统结构图

Fig. 1 Illustration of thermal test equipment

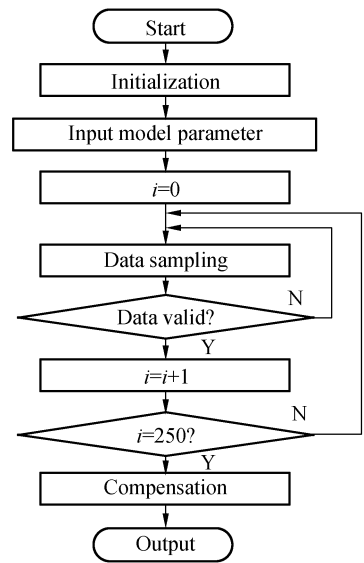


图 2 温度补偿流程图

Fig. 2 Flowchart of temperature compensation

3.2 静态温度实验及结果分析

实验过程:将系统置于转台温箱内,每隔 10°C 取为 1 个温度点,选取 $-40^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ 间共 11 个等间隔温度点对陀螺进行八位置测试。系统在每个温度点保温 4 h 后,分别在东南地、天南东、西南天、地南西、西北地、天北西、东北天、地北南八个位置进行整周期采样试验。每个位置采样 1 min,实验重复进行几次。求取各温度点下激光陀螺的零偏输出,通过最小二乘拟合方式求取式(3)中温度模型的系数,结果如表 1 所示。为验证模型的拟合效果,在室温下进行了内插实验。

表 1 激光陀螺静态温度模型

Tab.1 Static temperature model parameters for RLG

通道	Model parameters				Fitting errors
	A_{i0}	A_{i1}	A_{i2}	A_{i3}	
1	0.152	1.36e-3	5.66e-6	1.64e-7	0.007 0
2	-0.144	1.5e-3	-5.81e-5	-1.13e-6	0.001 2
3	0.006 3	-7.57e-4	3.48e-5	3.77e-7	0.001 0

利用表 1 中静态模型参数对该陀螺某次大变温环境下实验数据进行温度补偿验证。图 3 为经过补偿前后激光陀螺各系统轴向上的输出曲线,其中实线为温度补偿前,虚线为温度补偿后结果。

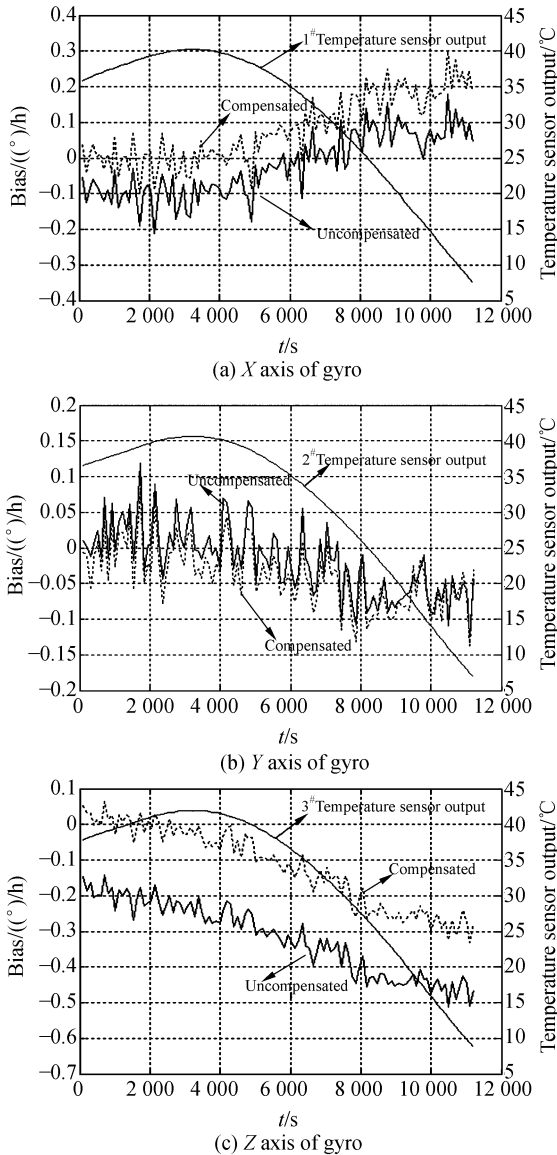


图 3 静态模型温补前后陀螺系统轴零偏漂移曲线
Fig. 3 Bias drift of RLG with static temperature model before and after compensation

可以看出,当系统处于小范围内变温或短时间工作状态,静态温度模型对系统性能改善良好。但随着系统工作时间加长,处于大变温率或大范围的温度变化等环境情况时,静态温度模型对动态温度误差补偿效果不显著。

3.3 动态温度试验及补偿验证

实验过程:系统北天东位置静置于温箱内,温箱起始温度 +40 °C,保温数小时,系统上电 10 min 后,温箱从 +40 °C 以 -1 °C/min 降到 -30 °C,继续保温 20 min,记录整个测试过程中激光陀螺三个通道的输出及温度传感器的数值。实验重复进行几次。

将得到的实验数据首先依据拉依达准则进行预处理,选取陀螺零偏动态温度模型如式(4)所述。采用多元回归等方法,求取动态温度模型各个系数 k_i 、 p_i 和 q_i ,并按照预报误差最小的原则,利用几组重复性试验数据对所求的模型系数进行修正,从而得到最终的温度模型系数 k_i' 、 p_i' 和 q_i' 。表 2 为三轴激光陀螺各通道轴向上的动态温度模型系数。

表 2 通道轴向动态模型参数值

Tab.2 Dynamic model parameter values

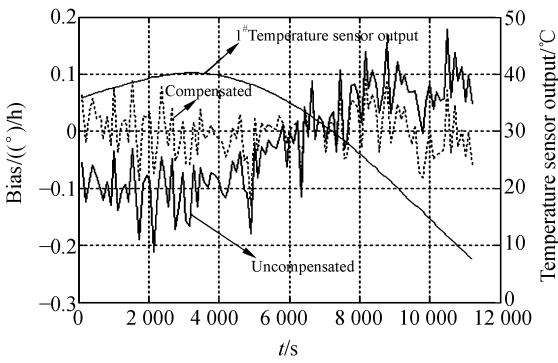
通道	Parameters			Corrected parameters		
	k_i (°/h) /°C	p_i (°/h) /°C	q_i (°/h)/ (°C/min)	k_i' (°/h) /°C	p_i' (°/h) /°C	q_i' (°/h)/ (°C/min)
1	-0.001 4	0.025 3	0.014 0	-0.001 7	0.027 4	0.014 5
2	0.000 2	-0.006 2	-0.011 6	0.000 1	-0.007 0	-0.012 3
3	0.004 1	-0.039 6	0.010 7	0.004 2	-0.040 8	0.010 8

利用表 2 中的模型系数并参照图 2 温度补偿流程,对 3.2 部分所用实验数据重新进行温度补偿验证,补偿结果如图 4 所示。

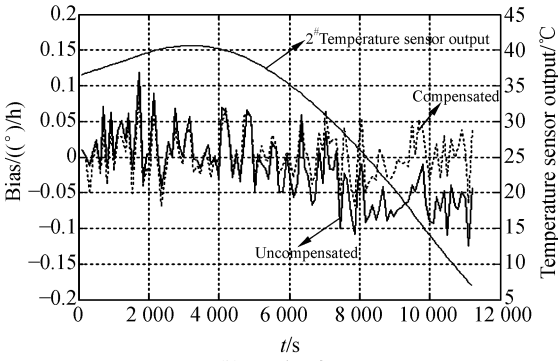
图 4 描绘了利用动态模型对三轴激光陀螺补偿前后各系统轴向上的静态零位漂移的对比曲线。实验结果表明,该温度模型能对大变温率或大范围温变环境下陀螺的温度漂移进行有效补偿。

3.4 静、动态温度模型补偿结果对比分析

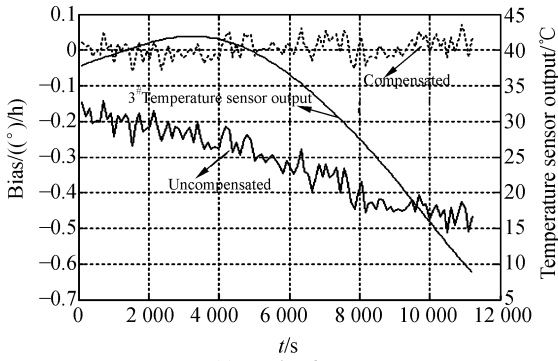
对比图 3 及图 4 中温补前后零偏漂移曲线,



(a) X axis of gyro



(b) Y axis of gyro



(c) Z axis of gyro

图 4 动态模型温补前后陀螺系统轴零偏漂移对比

Fig. 4 Bias drift of RLG with dynamic temperature model before and after compensation

可以得出以下结论:(1)静态温度模型能够改善陀螺某静态温度点处小范围内的漂移,但对大范围变温或大变温率等情况下陀螺性能的改善效果不显著;(2)动态温度模型能对上述恶劣环境条件下激光陀螺的温漂进行有效补偿。表 3 中给出了温度补偿前后陀螺零偏漂移百秒标准差对比,从定量角度对这一结论做了有力说明。

表 3 陀螺温度补偿前后结果对比

Tab. 3 Compensation results of a RLG vs uncompensated ones

Gyro	Standard variance of drift((°)/h)		
	Uncompensated	Static model compensated	Dynamic model compensated
X-axis	0.086 7	0.093 2	0.043 0
Y-axis	0.048 7	0.043 5	0.033 7
Z-axis	0.100 6	0.111 5	0.027 2

3.5 说明

(1)不同的三轴机抖陀螺,其温度模型参数会不尽相同,故应对单个陀螺分别标定。

(2)温箱内实验环境的热不均衡、风扇的振动、电磁干扰及惯导测试设备自身精度等因素,也会对温度模型造成一定的误差影响。

(3)所建立的温度模型是否可行,取决于陀螺性能是否稳定,通过对本型号陀螺重复性实验发现,其性能较为稳定,具有可补性。

(4)为有效验证动态温度模型的可靠性,分别通过改变实验起始温度或变温率进行多次实验,动态模型温度补偿结果均符合实验设计要求。

(5)本文所讨论的温度模型无论是静态的还是动态的,均为确定性误差模型。由于该陀螺温度补偿后精度已达到系统指标设计要求,故没有对温度随机误差模型展开研究。若要进一步提高精度,可考虑温度随机误差的建模补偿问题,这也是本课题未来的一个研究方向。

4 结 论

针对某型三轴激光陀螺温度误差,提出了动态建模及测试方案。新的测试方案比传统的静态方案实验周期缩短一半以上,且易于工程实现。实际的测试结果表明,用动态方案标定出的温度模型对大范围温度变化或大变温率等恶劣环境下陀螺的漂移都能进行有效的补偿,且补偿精度明显优于静态温度模型,在全温度范围内低于 0.05 °/h。

参考文献:

- [1] TITTERTON D H, WESTON J L. *Strapdown Inertial Navigation Technology (Second Edition)* [M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2004.
- [2] 金世龙, 李晓红, 杨开勇, 等. 四频差动激光陀螺法拉第旋光片的加工[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):22-25.
JIN SH L, LI X H, YANG K Y, *et al.*. Arts of Faraday effect element of the four mode RLG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):22-25. (in Chinese)
- [3] 吴国勇, 顾启泰, 郑辛, 等. 环形激光陀螺温度模型[J]. 清华大学学报, 2003, 43(2):180-183.
WU G Y, GU Q T, ZHENG X, *et al.*. Thermal model of ring laser gyro [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2003, 43(2):180-183. (in Chinese)
- [4] FIDRIC B G. Ring laser gyro frame design resistant to thermal gradient effects [P]. US: 4867567. Sep. 19, 1989.
- [5] BUCHLER R J, MOELLERT L R, FANN S W, *et al.*. Temperature compensation method for strpdown inertial navigation system [P]. US: 6175807, Jan. 16, 2001.
- [6] 徐清雷, 韩冰, 邓正隆. 激光陀螺捷联惯性组合的全温度标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(6):4-7.
XU Q L, HAN B, DENG ZH L. Calibration method for laser strap-down inertial measurement unit in all environment temperature[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004, 12(6):4-7. (in Chinese)
- [7] 赵小宁, 李县洛, 雷宝权. 激光陀螺零偏温度补偿研究[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(3):55-57.
ZHAO X N, LI X L, LEI B Q. Temperature compensation for ring laser gyro[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004, 12(3):55-57. (in Chinese)
- [8] 张鹏飞, 龙兴武. 二频机抖激光陀螺小范围温度漂移补偿模型的研究[J]. 激光杂志, 2006, 27(2):44-45.
ZHANG P F, LONG X W. Research on temperature compensating model of mechanically dithered RLG' s bias within certain temperature limits[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(2):44-45. (in Chinese)
- [9] 陈刚, 张朝霞, 庄良杰. 捷联式惯性系统陀螺仪数据分析与温度建模[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6):1428-1433.
CHEN G, ZHANG ZH X, ZHUANG L J. Data analysis and temperature modeling of gyroscope in strap-down inertial systems [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(6):1428-1433. (in Chinese)
- [10] IEEE STD 647-2006, IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros[S].

作者简介:葛文涛(1976—)男,山东日照人,哈尔滨工业大学博士研究生,研究方向为导航、制导与控制。E-mail: wtge@hit.edu.cn

邓正隆(1939—),男,哈尔滨工业大学教授,博士研究生导师,研究方向为惯性技术、现代控制理论应用及智能信息处理。E-mail: deagle@public.hr.hl.cn