

文章编号: 1000-6893(2001) 01-0057-04

环形激光陀螺误差测试及估计

郑露滴¹, 汤全安², 章燕申²

(1. 朗讯贝尔实验室 基础科学研究院, 北京 100080)

(2. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

ERROR TESTING AND ESTIMATING OF RING LASER GYRO

ZHENG Lu-di, TANG Quan-an, ZHANG Yan-shen

(1. Lucent Technologies, Bell Labs Research China, Beijing 100080, China)

(2. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 在引进 L-1 型环形激光陀螺(Ring Laser Gyro, RLG) 的基础上, 对 RLG 的各项误差, 包括零偏、标度因数等的测试和估计进行了实验研究。对比研究了两种随机游走系数的计算方法; 根据高低温环境测试数据, 建立了零偏温度模型并进行了补偿; 在国内首次采用 Allan 方差技术对 RLG 的各误差成分进行了分离和估计, 实验证明 Allan 方差法为一种评估 RLG 性能的有效方法。

关键词: 环形激光陀螺; 误差模型; Allan 方差

中图分类号: V241.5+58, V241.62+2 文献标识码: A

Abstract: On the basis of the L-1 ring laser gyro (RLG), the test and estimation of RLG's errors, including bias, scalefactor, etc., are studied experimentally in this paper. Two kinds of algorithms are compared and analyzed to calculate the random walk coefficient of RLG. According to the data derived from the environmental temperature test, a temperature model of RLG is established and the compensation is also performed. For the first time in China, the Allan variance technique is applied to separate and estimate RLG's errors, which is experimentally proved to be an effective method to evaluate the RLG's performance.

Key words: ring laser gyro (RLG); error model; Allan variance

当前, 惯性导航系统在国内现代化领域中的地位越来越重要, 作为惯性导航系统的核心器件, 光学陀螺受到广泛的重视^[1]。国际上, RLG 是目前唯一实用化、高精度的光学陀螺^[1], 在很长时期内, 将不能被其它种类陀螺所取代。当前, 我国在 RLG 的研制方面还有较大的差距。

对 RLG 误差的测试和估计是研制 RLG 及其导航系统的关键技术之一^[2]。清华大学从 1992 年开始进行 RLG 控制和测试系统的研制工作, 先后完成了高精度控制及测试系统电路和计算机测试系统, 利用所研制的测试系统, 对引进的 L-1 型 RLG 的随机游走系数(Random Walk Coefficient, RWC)、零偏、标度因数等参数进行了测试, 并进行了高低温环境下的零偏测试, 建立了零偏温度模型并进行了补偿。首次在国内采用了 Allan 方差技术对 RLG 的多个误差成分进行了分离, 建立了一种评估 RLG 性能的有效方法。

1 随机游走系数

对于机械抖动偏频的 RLG, RWC 是一个重

要的指标, 分别采用 IEEE 推荐的 RLG 标准测试方法和拟合法对其进行了估计, 结果很相近。

第 1 种为直接计算法, 这是 IEEE RLG 测试标准中采用的方法^[3]。这种方法的核心是: 认为 RLG 噪声的主要部分是随机游走噪声, 可以对量化噪声的影响忽略不计。据此, RWC 可由零偏测试数据经式(1)直接计算得出

$$RWC = \frac{\sigma_b}{60} \frac{1}{T} = \frac{\sigma_N}{60} \frac{1}{TK} \quad (1)$$

式中: RWC 的单位为($^{\circ}$ /h); σ_b 为零偏角度标准差; T 为积分时间; σ_N 为零偏脉冲标准差; K 为 RLG 标度因数。根据此方法计算得出 L-1 型 RLG 的 RWC 小于 0.0017($^{\circ}$ /h)。

第 2 种是拟合系数法^[2]。以 1s 为采样时间间隔进行测量, 得到的脉冲序列为初始样本序列; 在初始样本的基础上, 计算对应不同积分时间 T 的零偏稳定性。零偏稳定性模型方程为式(2)。通过最小方差二次多项式拟合, 可得其中的各项系数

$$\sigma^2(T) = a_0 + \frac{a_1}{T} + \frac{a_2}{T^2} \quad (2)$$

式中: $\sigma(T)$ 为 RLG 零偏稳定性, 单位为($^{\circ}$ /h)

\bar{h} ; a_0, a_1, a_2 分别为拟合曲线各项系数。

$$RWC = \frac{\bar{\sigma}^2(T)}{a_1} \quad (3)$$

当 T 从 $1s$ 逐渐变化到 $100s$ 时, $\sigma^2(T)$ 与 $1/T$ 之间关系见图 1, 图中虚线为测试数据曲线, 按式 (2) 进行二次曲线拟合, 拟合曲线为实线所示, 得到的拟合曲线方程系数为 $a_0 = 4.28847 \times 10^{-6}$ ($(\text{°})/\text{h}$)², $a_1 = 2.57603 \times 10^{-6}$ ($(\text{°})/\text{h}$), $a_2 = 2.09966 \times 10^{-8}$ (°)²。

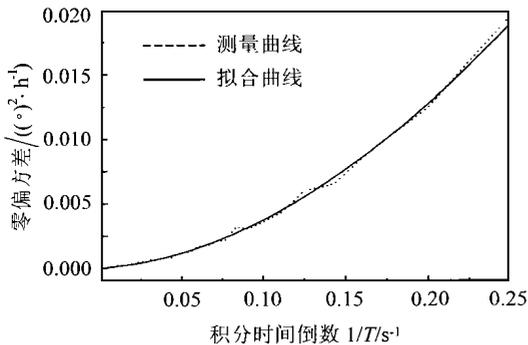


图 1 $\sigma^2(T)$ 与 $1/T$ 之间关系测量及拟合曲线

Fig. 1 $\sigma^2(T)$ versus $1/T$ measurement and fitting curves

得到的零偏稳定性模型则为

$$\sigma^2(T) = 4.28847 \times 10^{-6} + 2.57603 \times 10^{-6} T^{-1} + 2.09966 \times 10^{-8} T^{-2} \quad (4)$$

由此得到 $RWC = \frac{\bar{\sigma}^2(T)}{a_1} = 0.0016(\text{°})/\text{h}$ 。

拟合方程 (2) 中 a_0 是个很小的值, 可忽略不计, a_2 代表量化噪声, 实际测量中, a_0, a_2 都很小。这说明, 实际上量化噪声在 RLG 中的影响很小, 而随机游走在 RLG 噪声中占绝大部分, 这与第 1 种测量方法的思想相同, 其结果也很接近。

采用积分时间为 $100s$ 的数小时测试样本, 可用直接计算法计算出 RWC, 而采用拟合法则只需约 $1h$ 的零偏测试样本, 但要求测量时积分时间较短, 如为 $1s$ 。直接计算法比拟合法计算方便, 而拟合法数据处理较为复杂。这两种方法的基本思路都认为, 与量化噪声相比, 随机游走在 RLG 误差中比重很大, 从而前者可忽略不计。

2 零偏温度模型及补偿

温度对 RLG 的零偏有重要的影响, 为了研究温度对 RLG 零偏的影响, 在 55 、 25 和 -10 环境温度下, 对 L-1 型 RLG 进行了高低温零偏测试。表 1 给出了零偏测试结果。

为测量 RLG 的温度变化, 分别在 L-1 型

RLG 的谐振腔块和壳体上安装了温度传感器 (热敏电阻), 其热敏电阻值分别以 T_1, T_2 表示。对零偏和热敏电阻同步测量, 得到零偏值与 T_1 的实验及拟合关系曲线见图 2, 图中横轴为 T_1 与 T_0 之差, T_0 为室温 25 时的热敏电阻值。

表 1 RLG 的高低温零偏测试结果

Table 1 RLG bias measurement result under different temperatures

测试时间	温度/ (°C)	零偏/ (°·h ⁻¹)	零偏稳定性/ (°·h ⁻¹)
1	55	-0.25	0.02
2	25	-0.29	0.01
3	-10	-0.08	0.02

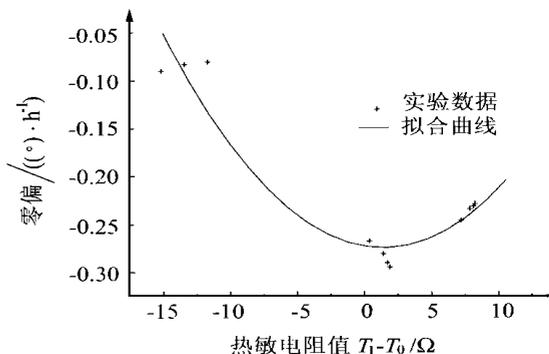


图 2 零偏与 $T_1 - T_0$ 实验关系曲线

Fig. 2 Bias versus $T_1 - T_0$ measurement curve

从图 2 中可看出零偏与绝对温度的关系。采用二次曲线拟合方法, 得到 RLG 的温度模型为

$$\Omega = -0.27264 - 0.00233(T_1 - T_0) + 0.0008(T_1 - T_0)^2 \quad (5)$$

式中: Ω 为零偏值, 单位为 $(\text{°})/\text{h}$ 。由于 T_1 是 RLG 谐振腔块温度的热敏电阻值, 所以在建立零偏模型时采用了 T_1 , 这样可以直接反映 RLG 内部工作介质的温度变化。

运用式 (5) 中的温度模型对 RLG 的零偏数据进行补偿, 图 3 为常温条件下, 补偿前和补偿后的零偏变化曲线。由图中可以看出, 补偿前、后零偏值相差 30 倍, 从 $-0.29(\text{°})/\text{h}$ 降低到 $-0.01(\text{°})/\text{h}$, 这表明零偏误差的温度补偿效果显著。

3 Allan 方差法

Allan 方差是一种基于频域的分析方法, 国外 RLG 的性能评估中, 已开始采用这种方法^[4]。Allan 方差法的最大优点是可以简便地细化分离、辨识 RLG 各项误差, 同时确定各误差项对总误差的贡献。RLG 的误差包含许多成分, 其中主要包括零偏稳定性、随机游走、量化噪声等, Allan 方差法为分离以上各项误差提供了有力的手段。

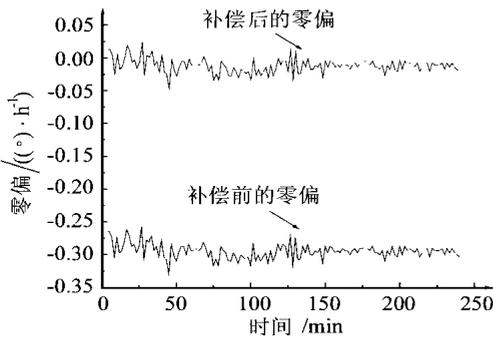


图 3 经温度模型补偿前、后常温零偏曲线

Fig. 3 Bias curve under room temperature

(before and after temperature compensation)

这种方法的基本依据是 RLG 的各噪声分布于不同的频段上, 如量化噪声对应高频段, 而随机游走一般位于小于 10Hz 的频段, 零偏稳定性在更低的频段, 如图 4 所示。

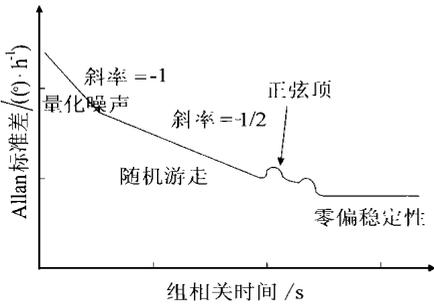


图 4 Allan 方差法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of allan standard variance method

当采样频率为 f_s , 采样输出角速率的总采样数为 N , 把 N 个采样点进行分组, 得到 $I = N/L$ 个组, 每组有 L 个点, 相应的组平均时间为 τ , $\tau = L/f_s$ 。分别求每组采样点均值, 得到 I 个均值: m_1, m_2, \dots, m_I , Allan 方差可由下式给出

$$\delta_a^2(\tau) = \frac{1}{2(I-1)} \sum_{i=1}^{I-1} (m_{i+1}(L) - m_i(L))^2 \quad (6)$$

Allan 方差与信号功率谱密度之间的关系如下

$$\delta_a^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_a(f) \frac{\sin(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (7)$$

式中: τ 为组相关时间; $S_a(f)$ 为角速率的功率谱。利用上式可以对 RLG 的各项误差进行频域分析。由频域分析结果可得以下 Allan 标准差模型

$$\delta_a^2(\tau) = a_0 + \frac{a_{-1}}{\tau} + \frac{a_{-2}}{\tau} \quad (8)$$

式中: a_0, a_{-1}, a_{-2} 分别是反映 RLG 的零偏稳定

性 δ_b , RWC 和量化噪声 Q 的拟合方程系数。采用此 Allan 标准差模型, 通过最小方差拟合, 可以求出其中各项系数, 从而得到各误差项, 经换算可得

$$\left. \begin{aligned} \delta_b &= a_0 / 0.6643 \text{ (} \text{ }^\circ/\text{h)} \\ \text{RWC} &= a_{-1} / 60 \text{ (} \text{ }^\circ/\text{h)} \\ Q &= a_{-2} / \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

利用 Allan 方差法对 L-1 型 RLG 测试结果进行分析。当采样时间为 1s, Allan 标准差实验数据曲线如图 5 所示, 拟合后, 得到 Allan 标准差模型为

$$\delta_a(\tau) = 0.0023 + \frac{0.05}{\tau} + \frac{0.556}{\tau} \quad (10)$$

因此可以计算得到 $\delta_b = 0.003 \text{ (} \text{ }^\circ/\text{h)}$, $\text{RWC} = 0.001 \text{ (} \text{ }^\circ/\text{h)}$ 和 $Q = 0.32 \text{ arcsec}$ 。这一分离和估计结果与此 L-1 型 RLG 的标称值及采用其它单项估算方法的结果相符。

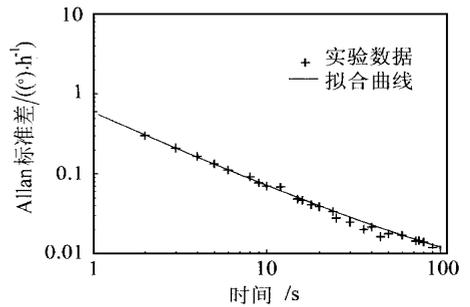


图 5 Allan 标准差实验及拟合曲线

Fig. 5 Measurement and fitting curves of Allan standard variance

4 小结

在自行研制的 RLG 控制和测试系统的基础上, 对 L-1 型 RLG 进行了全面的误差测试和估计。用直接计算法和拟合系数法对 RLG 的 RWC 的估计结果相近, 这两种方法可适用于不同类型的数据样本。对 RLG 零偏温度测试和补偿表明, RLG 零偏温度补偿是必要的, 文中建立的误差模型可将 L-1 型 RLG 的零偏降低 90%。采用 Allan 方差法分离和估计 RLG 的各项误差具有精确、简便的优点, 其精度与其它单项误差估计方法相同, 因此, 它是一种 RLG 性能评估的有效方法。

参 考 文 献

[1] 郑露滴, 汤全安, 章燕申. 激光陀螺仪的现状与发展趋势 [J]. 中国仪器仪表, 1995, 30(4): 4~6.

[2] Malthan H. Test of a Honeywell GG-1342 ring laser gyro [A]. Symposium Gyro Technology [C]. Stuttgart.

Germany. 1982. 2. 0 ~ 2. 22.

[3] IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros[S]. IEEE Std 647 ~ 1981, 1981.

[4] Tehani M. Ring laser gyro data analysis with cluster sampling technique[A]. SPIE[C]. 1983. 412: 207 ~ 220.

作者简介:

郑露滴 于 1991 年和 1996 年分别获得清华大学精密仪器系学士、博士学位。1997 年至 1999 年在新加坡南洋理工大学任博士后研究员。从事光学陀螺、光学传感器及机械传感器的研究工作。



汤全安 教授, 1961 年毕业于清华大学自动控制系, 长期从事自动控制, 光学陀螺及光波导陀螺的教学科研工作。



章燕申 教授, 博士生导师, 1950 年毕业于清华大学。1957 年毕业于莫斯科国家技术大学, 获博士学位。1958 年建立清华大学导航与自动控制教研组, 长期从事自动控制, 静电陀螺, 光学陀螺及光波导陀螺的教学科研工作。

中国航空学会 2000 年“航空产业与西部大开发” 学术年会在西宁召开

中国航空学会“航空产业与西部大开发”2000 年学术年会于 2000 年 8 月 17 日至 20 日在青海省西宁市隆重召开。来自全国各地航空工业系统、民航系统、航天系统、部队及高等院校的代表共 120 余人参加了本届年会。朱育理、王梦奎、杨育中、石川、王昂等领导参加了会议。

会议由屈见忠秘书长主持。朱育理理事长在开幕词中指出, 航空运输、通用航空和航空制造业在改善西部交通条件、加强西部生态环境建设和保护、加速西部基础设施建设等方面具有不可忽视的作用。抓住西部开发的历史机遇, 充分利用航空产业的特点和优势, 为西部开发建设服务, 同时加快产业自身的发展, 是当前我们必须认真研究和思考的重大问题。他还对这一问题的研究和建设提出了前瞻性、综合性、阶段性、区位性和可操作性等五点要求。国务院发展研究中心王梦奎主任应会议特别邀请作了题为《经济形势与西部开发》的报告, 受到热烈欢迎。

参加大会交流的 9 篇文章是: 中航一集团副总经理石川的《发挥优势、突破重点、量力而行、注重实施——中航一集团参与西部大开发的思考》, 钱家祥代表中航二集团公司飞机部的《通用飞机与西部大开发》, 中国民用航空总局刘功仕的《我国支线机场和支线航空发展问题》, 李都代表中国民航总局安全技术中心的《航空运输在西部大开发中的地位和发展的建议》, 王凤魁代表中国直升机公司的《直升机在西部大开发中大有作为》, 陕西航空工业局马西平等的《陕西航空工业将在西部大开发中崛起》, 王新代表中航一集团民品与科技产业部的《航空高科技产业进入西部大开发的商机分析》以及中航二集团发展研究部杨源的《在推进西部中寻求新突破》。

会议分为“西部大开发与航空产业面临的机遇、挑战和对策”、“西部大开发与通用航空”、“西部大开发与支线航空和支线飞机”、“西部大开发与航空航天技术”等 4 个专题进行分组交流。年会收录的其余 55 篇文章中, 有 35 篇参加了分组交流。代表们经过热烈讨论, 对航空产业在西部开发中面临的形势和各种问题有了更清楚的认识; 通过交流, 对航空产业在西部开发中的切入点和如何取得实效互相启发; 经过辩论, 不同观点的代表之间也增加了沟通和理解。在充分发表意见的基础上, 代表们对于给国家有关部门的建议书草案提出了中肯的修改意见。

会议闭幕式由学会专职副秘书长吴松主持。杨育中副总经理就发展新支线飞机问题作了重要讲话。王昂主任发表了讲话。屈见忠秘书长作会议总结。朱育理理事长在闭幕讲话中对这次会议给予了充分肯定, 认为这次会议是对“西部大开发与航空产业发展”这一跨世纪课题进行研究的一个良好开端, 以后还应深入进行一些专题性的研讨。

中国航空学会 学术工作部