

惯导系统参数重复性机理分析建模方法研究

杜祖良, 黄鹤, 胡平华, 苗成义

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 针对惯导系统参数长期重复性提出了基于微观过程分析的机理研究和建模方法, 可用于揭示惯导系统参数在多环境载荷作用下随时间推移发生变化的机理并建立相应的模型, 能够有效指导惯导系统参数变化控制技术方法研究和性能参数变化加速试验方法研究, 从而为解决惯导系统参数长期重复性问题奠定机理和模型基础。

关键词: 惯性导航系统; 长期重复性; 机理

中图分类号: U666.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2015)03-0001-10

Research on Analysis and Modeling Method for Repeatability Mechanism of Inertial Navigation System Parameters

DU Zu-liang, HUANG He, HU Ping-hua, MIAO Cheng-yi

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: The Long-term repeatability of parameters of INS (inertial navigation system) is one of the most important technical matters which has effect on fighting efficiency and maintainability of modern precision-guided weapon. A research and modeling method based on microscopic analysis is proposed for revealing the mechanism and building models of changes on INS parameters initiated by multi-environmental loads and time. Controlling means and accelerated test methods for the changes of INS parameters can be researched on this basis, which is the foundation for solving the problems caused by long-term repeatability of INS parameters.

Key words: INS; Long-term repeatability; Mechanism

0 引言

惯导系统的工作过程是通过采集陀螺、加速度计等测量信号, 在给定运动初始条件下, 由计算机按照一定的数学模型解算出载体的姿态、速度、位置等导航信息。数学模型的作用在于描述惯导系统和惯性器件的基本特性, 为了获得准确的模型参数, 就需要对惯导系统进行标定。

标定得到的参数被存储在惯导系统的导航计算机中, 作为导航解算的基本信息。但是在存贮、运输、使用等过程中, 随着时间的推移, 内因

(如应力释放、材料蠕变^[5]等) 和外因(如振动、温湿度变化、电磁场等)的共同作用会导致惯导系统的实际参数发生变化。使得实际参数与导航解算所用参数之间的一致程度下降, 从而导致数学模型对于系统和器件描述的准确度降低, 最终影响整个系统的性能和精度。

对于惯导系统参数变化的这种特性, 一般采用参数重复性的概念来描述, 是指在条件转换或经过非工作状态后, 恢复到原有测量条件并在规定的时间间隔内重复测量惯导系统同一参数所得结果之间的一致程度^[8]。这种一致程度越高, 则

收稿日期: 2015 - 3 - 21; 修订日期: 2015 - 4 - 15。

作者简介: 杜祖良, 男, 研究员, 博导, 主要从事导航控制方面的研究。

惯导系统的参数重复性越好，反之则参数重复性差。在实际使用中，有时还采用性能保持期来描述惯导系统的参数变化特性，它是指参数重复性能够保持在预定范围内的时间。

惯导系统作为现代精确制导武器的核心导航设备，如果其参数长期重复性差将带来严重的影响。首先是严重制约武器系统作战效能的发挥，主要体现在：使用过程中惯导系统需频繁返回技术阵地进行标定测试，严重影响武器战备值班时间；作战前惯导系统需完成大量标定测试工作，延长了武器作战准备时间。其次是严重降低武器系统使用维护性能，主要体现在：惯导系统频繁、复杂的标定维护工作对场地、人员、设备等配套条件需求多，显著增加了武器使用维护成本；惯导系统标定维护工作量大，涉及导弹拆装及测试多个环节，增加了武器使用维护的复杂程度。

标定不能改变惯导系统本身的参数重复性，相反对参数的标定和补偿是建立在参数具有重复性基础上的。如果参数重复性不具备足够的水平，在短时间内惯导系统的误差就超过允许范围，使得标定的时间间隔非常短，给实际使用带来的代价将是无法接受的。因此，要有效控制甚至消除惯导系统参数长期重复性的不良影响，必须从研究掌握惯导系统参数在各种环境因素作用下随时间变化的机理，在此基础上从根本上采取全面有效的技术措施。

惯导系统的种类很多，按照结构主要可分为传统的平台式、捷联式以及近年来国内发展迅速的旋转调制式。虽然不同形式的惯导系统在性能和具体实现方式方面有各自的特点，但在参数长期重复性方面可以提炼出许多共性基础理论和方法。因此本文以一种典型的平台惯导系统主要对象，开展参数长期重复性的机理和模型研究，其研究成果可以在其他类型惯导系统中推广应用。例如，装配应力松弛规律对惯性器件安装误差的影响研究以及稳定化方法，无论对于平台惯导系统还是捷联和旋转调制惯导系统都是适用的；平台惯导系统中壳体效应机理及解决措施的研究方法可用于指导研究解决同样存在于旋转调制型惯导系统中的壳体效应问题。

1 惯导系统参数时变机理分析建模基本方法

惯导系统是精密、复杂的产品，其参数随时

间变化影响因素多且各因素间相互关系错综复杂，同时研究对象非常精细且研究周期长，因此完成惯导系统参数时变机理的分析建模是一项非常困难的工作。

为了解决这一问题，本文认为惯导系统参数时变机理的分析建模应在分析产品工作原理的基础上，深入研究器件及材料微观特性，阐明机理并建立模型，同时注意利用实测历史数据和环境验证试验等进行及时、充分的验证，形成闭环研究方法，确保机理研究和模型建立的正确性。其研究主要分为以下四部分：

1) 从系统、器件的工作原理出发，深入研究惯性器件及系统参数变化的内在机制，建立其参数与内部影响因素间的关系模型，确定影响平台惯导系统参数变化的内部关键因素；

2) 从研究材料、器件等内部特性微观变化机理入手，研究引起惯性器件及系统参数变化的外部原因，确定多环境载荷对惯导系统内部特性的影响，建立内部影响因素与多环境载荷间的关系模型；

3) 在上述工作的研究基础上将惯性器件及系统参数变化的内在机制和外部原因结合起来，应用各种建模手段，依据参数与内部影响因素间的模型以及内部影响因素与多环境载荷间的关系模型，提炼出系统参数变化的工程化模型；

4) 收集、分析典型产品实际使用条件下的标定测试历史数据，应用数据分析手段挖掘产品实际参数变化规律，为成果验证提供实测数据依据，也可开展惯导系统参数变化机理分析及建模研究确定关键重点提供帮助。

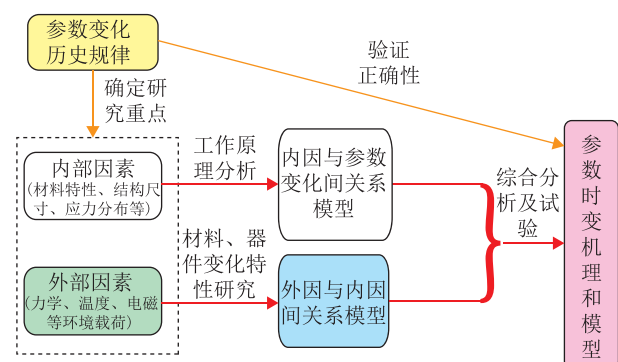


图 1 惯导系统参数变化机理分析建模基本方法
Fig. 1 The basic analysis and modeling method for diversification mechanism of INS parameters

惯导参数变化机理分析建模方法如图 1 所示。

2 惯导系统参数时变机理分析建模方法在某型平台惯导系统上的应用研究

某型平台惯导系统采用小型高精度动力调谐陀螺和石英挠性加速度计构成小型三轴指示性惯性稳定平台方案。针对这一型惯导的器件和结构特点，应用前述方法完成了对其参数时变机理的分析建模研究。

2.1 某型平台惯导系统参数时变机理分析建模技术方案及成果

影响该型平台惯导系统参数稳定性的关键在于陀螺、加速度计和惯性平台三部分，因此主要针对这三个研究对象从外因和内因两方面，深入研究仪表工作原理和材料基本特性，揭示了其关键参数的变化机理并建立了相应的模型，最终得到了整个平台惯导系统的参数变化机理及其模型。研究具体实施技术方案如图 2 所示。

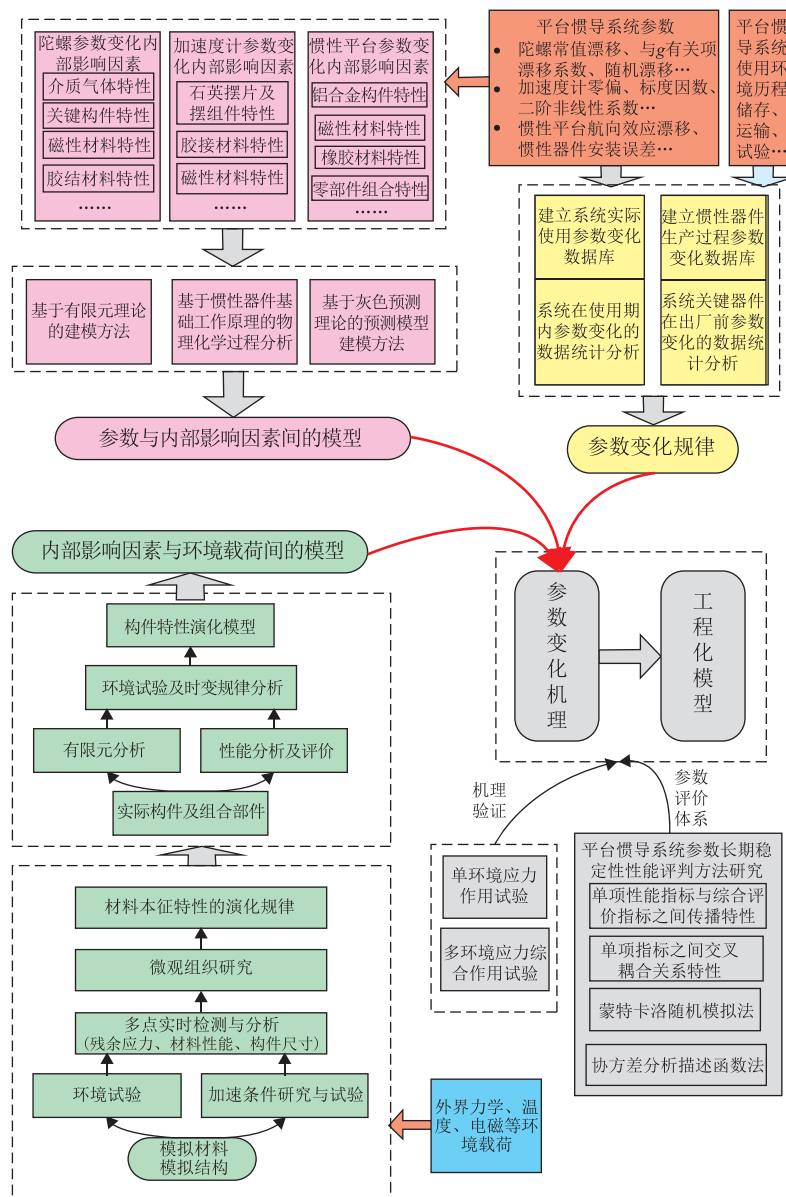


图 2 某型平台惯导系统参数时变机理分析建模技术方案

Fig. 2 The analysis and modeling technology project for diversification mechanism of INS parameters

按照此技术方案，最终阐明了该型平台惯导系统参数变化的内在机理，确定了关键影响因素。表 1 列出了研究得到的其 3 大类 10 余项参数变化的主要影响因素。

表 1 某型平台惯导系统主要参数关键影响因素
Tab. 1 Key influence factors of mostly parameters for a certain INS

类别	参数	参数变化主机理
系统中与陀螺相关参数	陀螺常值漂移率	非金属构件放气引起内部气压变化
	陀螺轴向静不平衡漂移率	粘结剂蠕变引起转子组件轴向位移
	陀螺正交静不平衡漂移率	挠性接头蠕变
	陀螺力矩器标度因数	磁钢磁性能退化
	陀螺与 g^2 相关的漂移率	挠性接头刚度变化
系统中与加速度计相关参数	加速度计零偏	预负载变化和摆组件胶接剂蠕变
	加速度计标度因数	磁钢退磁和胶粘剂蠕变引起磁路变化
	加速度计二次项系数	电枢效应和磁结构不对称
系统中与惯性平台相关参数	加速度计安装误差	安装凸台平面度和装配应力变化
	平台壳体效应漂移	结构振动传递特性变化
	平台惯性器件安装误差	装配应力松弛引起的尺寸微变形

2.2 某型平台惯导系统参数时变机理分析建模情况示例

影响平台惯导系统性能的关键参数很多，其中平台壳体效应漂移是比较有代表性，因此本文以这一参数为例介绍平台惯导系统参数时变机理分析建模方法的应用。

2.2.1 平台壳体效应漂移产生机理研究

壳体效应漂移是随姿态角变化产生的一种附加平台漂移，而平台漂移的产生归根结底是陀螺漂移引起的，因此研究平台壳体效应漂移的产生机理就是要从各种环境因素影响陀螺漂移着手。通过深入分析动力调谐陀螺和惯性平台的工作原

理，可以得出影响平台壳体效应漂移的内部因素主要有内部温度场分布、磁场分布、各轴干扰力矩和伺服回路零位以及振动等，其作用机理简图如图 3 所示。

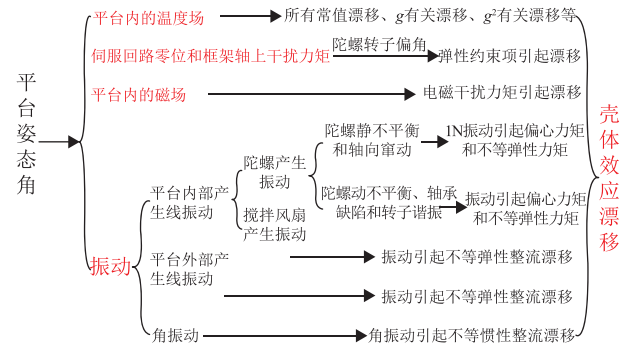


图 3 某型平台惯导系统平台壳体效应漂移产生机理
Fig. 3 Mechanism of production for heading sensitive drift of a certain INS

1) 平台内温度场引起平台壳体效应漂移的机理。虽然平台内部具有温控系统，可较好的控制内部温度随时间的漂移，但是由于结构和热传递过程等因素影响，平台内部的均匀温度变化和温度梯度都难以避免，因此当平台姿态角发生变化时，陀螺周围的温度环境会发生变化。而由于陀螺漂移自身具有温度敏感性，因此也会随之发生变化，从而引起平台壳体效应漂移。平台内温度场对平台壳体效应漂移的影响主要受温度场分布特性和陀螺温度敏感特性两方面因素的影响。

2) 各轴干扰力矩和伺服回路零位引起平台壳体效应漂移的机理。伺服电路零位通过引起陀螺失调角而引起陀螺的弹性约束项漂移，由于坐标分解器的作用，随着方位角的变化陀螺失调角也会变化，最终引起平台漂移的壳体效应。而平台的各框架轴上不可避免地会存在各种干扰力矩，若是框架轴上有干扰力矩，由于伺服回路刚度有限，陀螺转子同样必须产生失调角，以便使力矩电机产生一个力矩来抵消它们。这与伺服电路零位产生的影响是等效的，也会引起平台漂移的壳体效应。

3) 平台内磁场引起平台壳体效应漂移的机理。动力调谐陀螺的漂移同样具有磁敏感特性，在环境磁场发生变化时其漂移也会发生变化。平台中既有力矩电机磁钢等硬磁材料，也有隔磁环

和陀螺壳体等软磁材料, 这些都会影响到平台内部磁场分布。由于平台结构和零部件分布并不是完全对称, 因而其内部磁场空间分布也不是均匀的。因此当平台姿态角发生变化时, 陀螺受到的磁场干扰也会发生变化, 从而通过陀螺磁敏感系数引起陀螺漂移变化, 进而引起平台壳体效应漂移。平台内磁场对平台壳体效应漂移的影响主要受磁场分布特性和陀螺磁敏感特性两方面因素的影响。

4) 振动引起平台壳体效应漂移的机理。能够影响陀螺漂移的振动既有内部振动也有外部振动, 试验和分析表明, 对于平台壳体效应而言, 外部振动影响很小。平台内部振源主要为两个陀螺的自转振动和搅拌风扇的振动, 搅拌风扇的频率相对单一、幅值小, 而且距离陀螺比较远, 因此影响很小。而两个陀螺同在台体上, 相互距离很近, 振动谱很丰富且含有陀螺自身最敏感的频率, 因此可以认为平台内部振动主要就是两个陀螺自转振动的相互影响。陀螺自转振动在平台上引起频率分布十分丰富的振动干扰, 而由于动力调谐陀螺自身工作原理和构造特点的原因, 其漂移对于振动十分敏感, 因此平台会产生由振动引起的漂移。当平台框架角发生变化时, 陀螺受到的振动干扰就会随之发生变化, 从而导致平台壳体效应漂移的产生。在振动方面影响平台壳体效应漂移的主要是振源特性、平台振动传递特性以及陀螺振动敏感漂移三方面因素。

2.2.2 平台壳体效应漂移时变机理研究

(1) 平台壳体效应漂移变化主机理研究

为了完成平台壳体效应漂移在多环境载荷作用下的时变机理的分析建模, 需从内部温度场分布、各轴干扰力矩和伺服回路零位、磁场分布以及振动等四个方面研究平台壳体效应漂移变化主机理。

1) 通过研究, 可以得出温度场分布特性是引起平台壳体效应漂移的主要因素之一。但是进一步的测试和研究表明, 无论是热源特性、零件热容以及内部气体介质特性等影响平台内部温度场分布特性的各个因素, 还是影响陀螺温度敏感漂移的各个因素, 在平台长期贮存和使用过程中受正常外界环境载荷作用发生的变化较小, 因此其

对于壳体效应漂移的影响主要在幅值上, 而对于其幅值变化的影响则可以忽略, 所以内部温度场特性变化不是平台壳体效应漂移长期重复性问题的主机理。

2) 理论分析和试验结果表明, 影响平台框架轴干扰力矩、伺服回路零位和陀螺弹性漂移各个因素, 受正常外界环境载荷作用条件发生的变化很小, 加之现在惯性平台中对相关漂移的影响进行了补偿, 因此各轴干扰力矩和伺服回路零位变化不是平台壳体效应漂移长期重复性问题的主机理。

3) 通过研究, 可以得出磁场分布特性是引起平台壳体效应漂移的主要因素之一。但是进一步的测试和研究表明, 影响平台磁场分布特性和陀螺磁敏感系数的各种因素中, 无论是硬磁材料(如何服力矩电机磁钢、陀螺力矩器磁钢等), 还是软磁材料(内部隔磁环、陀螺壳体等)受正常外界环境载荷作用下发生的变化很小, 其影响一旦形成是固定的, 随着时间很少发生变化, 因此内部磁场特性变化不是平台壳体效应漂移长期重复性问题的主机理。

4) 通过对产品生产调试和用户贮存使用等实测数据进行统计分析, 以及相关的理论和试验研究发现, 平台内部振动特性变化与平台壳体效应漂移变化间具有密切的关系。因此针对振动引起平台壳体漂移的三个方面——振源特性、平台振动传递特性以及陀螺振动敏感漂移等, 研究其变化规律及影响是研究平台壳体效应漂移长期重复性问题的关键。

(2) 振动引起平台壳体效应漂移产生及变化机理研究

1) 平台内部振源特性的影响分析。平台上能够影响陀螺漂移的振源主要为两个陀螺的自转振动, 引起陀螺产生振动的因素主要有三部分: 轴承引起的振动、陀螺转子谐振引起的振动和电机磁势力波引起的振动。

①轴承引起的振动。主要包括轴承本身结构特点及加工装配误差引起的振动、轴承运行故障引起的振动以及上述振动的多次谐波。

②陀螺转子谐振引起的振动。主要是由陀螺接头刚度决定的转子的谐振点, 受轴承冲击振动

的激励而发生谐振振动。

③电机磁势力波引起的振动。通过电机气隙磁场磁势力波的作用，电源特性对于陀螺振动特性也有较明显的影响。

通过陀螺相应材料和零件分析及试验，陀螺内部的振源特性变化对于壳体效应漂移的影响相对微小，因此平台内部振源特性变化造成的影响不是平台内部振动特性变化的主要原因，因而也不是引起平台壳体效应漂移变化的主要原因。

2) 陀螺振动敏感漂移的变化分析。基于原理和构造的原因，动力调谐陀螺的漂移对振动比较敏感。对于动力调谐陀螺的振动敏感漂移，通常文献上指出的主要包括：沿驱动轴具有两倍旋转频率的角振动引起的漂移误差、垂直于驱动轴具有两倍旋转频率的线振动引起的漂移误差、平行于旋转轴一倍旋转频率的线振动引起的漂移误差以及当陀螺轴向和径向同时有同频率振动时因不等弹性力矩引起的漂移误差。经过深入研究，我们得出实际上还有沿自转轴方向一倍旋转频率的角振动引起陀螺漂移，以及当陀螺轴向和径向有同频率振动时因圆柱形力矩引起的漂移误差。经过补充完善后，动力调谐陀螺振动敏感漂移种类如表2所示。

表2 动力调谐陀螺振动敏感漂移列表

Tab. 2 Tabulation for vibration sensitive drifts of DTG

振动形式	振动方向	振动频率	引起漂移的原因
角振动	垂直于自转轴	两倍自转频率	由于陀螺结构特性
	沿自转轴方向	一倍自转频率	由于转子的摆性
线振动	垂直于自转轴	两倍自转频率	内外挠性轴不共面和平衡环的摆性及两挠性杆在OXY平面内不对称
	平行于自转轴	一倍自转频率	转子和平衡环有径向不平衡
	径向和轴向同时有相位相同的振动	任意频率	接头径向和轴向的刚度不相等
	径向和轴向振动相位相差90°	任意频率	接头的刚度有限

通过陀螺相应材料和零件分析及试验，陀螺内部结构特性变化对于壳体效应漂移的影响相对微小，因此陀螺振动敏感漂移特性变化造成的影响不是平台内部振动特性变化的主要原因，因而也不是引起平台壳体效应漂移变化的主要原因。

3) 振动传递通道的影响分析。在平台上工作时，陀螺带动平台作受迫振动，平台振动传递特性的变化，将影响陀螺所受振动的变化，因而通过引起陀螺振动敏感漂移从而影响平台漂移。因此需要建立平台的精细模型，准确分析其振动传递特性。

为了提高分析的准确度，首先需要建立轴承与惯性平台的刚度耦合接口模型。一般分析平台结构振动特性时，轴承通常都作为刚体处理，这使得分析结果的准确性受到了很大影响。为了克服这一问题，确保平台内部振动分析模型的准确性，首先对平台内部的轴承进行建模并研究其影响因素。轴承刚度计算以Hertz接触理论及轴承内部载荷分布模型为基础，利用有限元技术，建立了轴承整体刚度模型，考虑了各项内部和外部影响因素。对于该型平台，研究的重点是平台的方位轴承，为了满足平台内部振动场分析模型的研究，在上述模型的基础上进行了简化处理。简化后的轴承模型如图4所示。

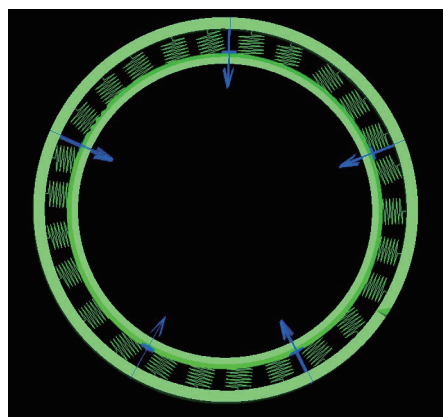


图4 惯性平台轴承模型图

Fig. 4 Model diagram of bearing in inertial platform

利用有限元技术建立惯性平台的模型，进行结构力学特性分析，分析中带入了上述轴承模型。以该模型为基础，分析了在不同航向角条件下的模态变化。表3给出了航向角分别为0°、90°、204°

和240°时，惯性平台前30阶整体模态中随航向角变化最为显著的8个模态的变化情况。

计算结果表明，航向角变化时惯性平台振动模态有明显的变化，说明平台振动传递特性会随着姿态角的变化而变化，使陀螺在不同航向角条件下工作时受到的振动干扰也随之发生变化，导致陀螺漂移变化，最终引起平台壳体效应漂移。

表 3 平台模态与航向角间关系仿真计算结果

Tab. 3 Simulation results of the relationship between platform vibration mode and azimuth

角度/ (°)	11 阶模 态/Hz	12 阶模 态/Hz	15 阶模 态/Hz	16 阶模 态/Hz	21 阶模 态/Hz	23 阶模 态/Hz	29 阶模 态/Hz	30 阶模 态/Hz
0	561.0	657.5	910.4	963.9	1548.6	1712.4	2238.5	2411.4
90	556.7	645.1	927.3	957.6	1534.2	1720.5	2250.3	2416.0
204	560.1	643.5	928.7	954.9	1528.4	1719.0	2248.1	2411.9
240	554.9	662.4	910.1	964.2	1542.7	1713.4	2209.0	2397.0
最大 变化	6.1	19.0	18.6	9.3	20.1	8.1	41.3	19.0

确定了这一点后，接下来要分析导致各框架角位置上平台振动传递特性在时间和环境载荷作用下发生变化的原因，这是研究平台壳体效应漂移变化及其影响的关键。

通过进一步研究得出，导致平台内部振动传递特性变化的关键因素是装配应力松弛。应力松弛一般可以划分为3个阶段：在第1阶段，应变迅速增加的同时应变率迅速降低；在第2阶段，应变率基本不变；第3阶段，应变率上升，直至材料失效。第1和第3阶段，随着应力变化，蠕变速度非常快，而第2阶段为稳态蠕变阶段，产品正常贮存和使用应力松弛一般处于这个阶段，稳态应力松弛符合 Hook-Norton 定律，如式 (1) 所示。

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{[1 + KE(n-1)\sigma_0^{n-1}t]^{\frac{1}{n-1}}} \quad (1)$$

式中， σ 为剩余应力，MPa； K 、 n 为 Norton 定律常数； E 为弹性模量，MPa； σ_0 为初始应力，MPa； t 为松弛时间，h。

应力松弛会导致结构的变形，包括弹性变形和塑性变形，前者将引起结构阻尼变化，后者将引起粘性阻尼变化。结构阻尼变化将对振动加速度传递的幅值特性产生影响，而粘性阻尼变化对

振动加速度传递的幅值和频率特性均会产生影响，进而改变平台内部振动特性。

影响平台内部振动传递特性最为重要的装配应力为方位轴承预紧力。利用前述模型，计算轴承在不同预紧力下 900~1000Hz 内响应点频率响应变化结果，如图 5 和图 6 所示。

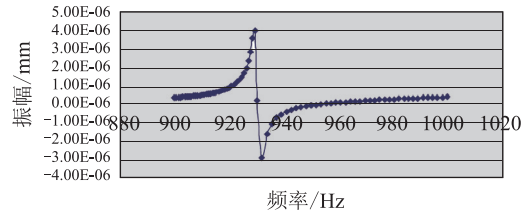


图 5 方位轴无预紧力时的平台幅频曲线

Fig. 5 The amplitude frequency curve of platform with 0 pretightening force on azimuth axis

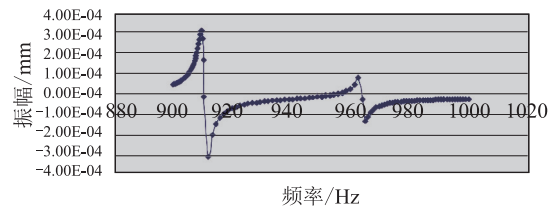


图 6 方位轴预紧力为 1N/mm² 时的平台幅频曲线

Fig. 6 The amplitude frequency curve of platform with 1N/mm² pretightening force on azimuth axis

从计算结果可见，预紧力变化的情况下，振幅和共振点均有变化，因此预紧力的变化对于轴承振动传递特性具有影响。特别是如果这些共振点出现在陀螺谐振点分布的频率段内，在某些情况下（如幅频特性谐振点与陀螺谐振频率接近甚至重合）则可能造成较大的影响。

由计算结果还可以看出，平台结构模态频率随轴承工况的不同有一定的变化，但通常情况下并不十分显著。但是轴承预紧力的变化在一些情况下对于局部振动传递特性产生明显的影响。对于方位轴承而言，这一点更为重要，因为其直接连接台体，与陀螺的距离很近，且幅频特性谐振点与陀螺谐振频率分布区间有重合部分，特殊情况下两者可能发生接近甚至重合的现象，使陀螺工作时受到的振动干扰发生较大变化，从而导致壳体效应漂移超差。

4) 相关测试验证情况。

为了验证平台内部振动特性变化结果,对平台工作时的台体振动随姿态角的变化情况进行了测试,结果表明,平台台体上的振动量随平台航向角的变化而出现了显著变化。由于在短时间内振源特性和陀螺漂移振动敏感特性是相对稳定的,说明振动传递通道的变化是引起平台壳体效应漂移的关键原因。图7给出了平台台体0~2kHz上的振动总量测试结果随航向角变化的情况。

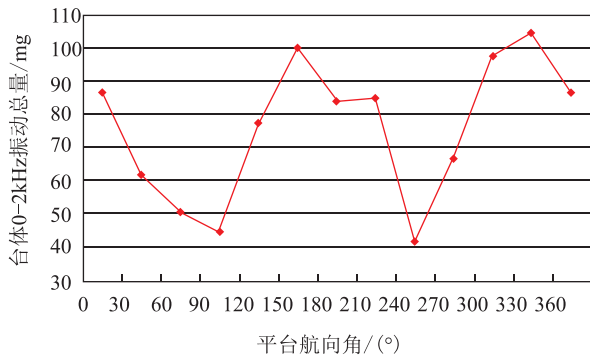


图7 平台台体0~2kHz上的振动总量测试结果
随航向角变化情况

Fig. 7 The test results of relationship between platform total vibration on 0~2kHz frequency range and azimuth

为了证实装配应力变化对惯性平台模态的影响,通过试验测试对调整方位轴承预紧力前后的平台模态进行了对比测试。对一套壳体效应漂移长期重复性超差的平台A进行了多个位置的谐振频率测量,其结果如图8所示。重新调整了惯性平台A方位环的预紧力,并对调整后的惯性平台A的谐振频率进行测试,结果如图9所示。可以发现多个模态谐振频率发生了变化。而参数标定结果表明,调整方位轴预紧力后这套平台壳体效应漂移的幅值和稳定性有较为明显的变化,从而证实了平台内部振动特性对平台壳体效应漂移的影响。

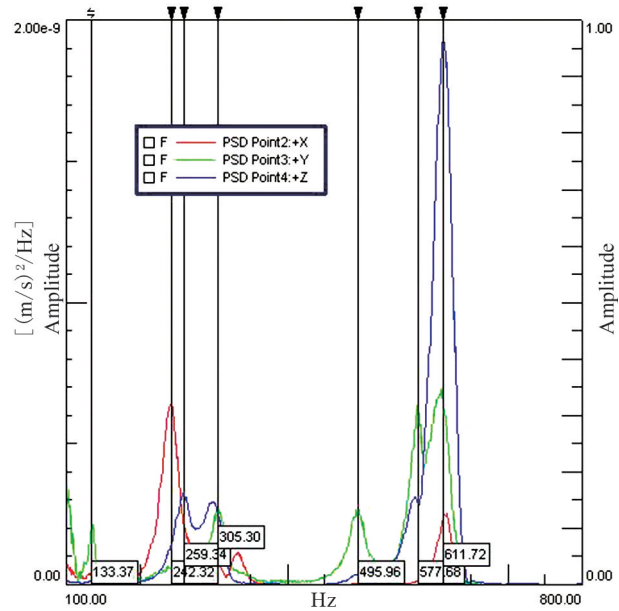


图8 调整预紧力前平台谐振点测试结果

Fig. 8 The test results of platform resonance point before pretightening force adjustment

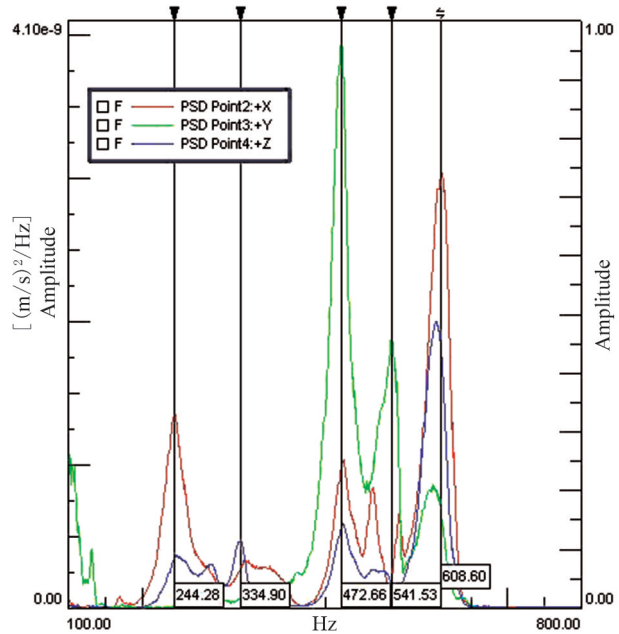


图9 调整预紧力后平台谐振点测试结果

Fig. 9 The test results of platform resonance point after pretightening force adjustment

3 惯导系统参数时变机理分析建模的作用和意义

研究惯导系统参数长期重复性问题,主要目的有两个:一个是延长惯导系统性能保持期,减小装备使用中的标定维护工作量,以提高武器作战效能,减低使用维护成本;另一个是解决惯导系统参数长期重复性难以快速、准确测试检验的问题,加快装备的研制交付进度。而掌握惯导系统参数时变机理,对于实现这两个目标具有十分重要的支持作用,因此可以说解决惯导系统参数时变机理分析建模问题是解决惯导系统参数长期重复性的基础。

3.1 为提高惯导系统参数长期重复性提供有力技术支持

提高惯导系统参数长期重复性的工作涉及系统设计、零部件制备、整机装调等各个环节,涵盖从材料器件、部组件、器件直到系统的各个层次,是一项复杂的系统工程。因此实现惯导系统参数时变机理的分析建模,全面、准确地掌握各种影响因素及其相互关系,对于从设计、零部件制备和整机装调等方面进行有效技术优化以提高惯导系统长期重复性有着十分重要的意义。

设计方面,依据惯导系统参数时变机理及模型可以准确掌握各项参数变化的误差因素和可控因素,从而建立有效的设计优化模型,提出系统完善的设计改进措施,为惯导系统提高参数长期重复性奠定基础;零部件制备方面,依据惯导系统参数时变机理及模型可以准确确定影响参数变化的关键零部件及其重要性能指标,同时还可以从中获得外界因素对于这些零部件重要性能指标的影响规律,从而可制定针对性强且有效的关键零部件性能评价和稳定化措施,控制影响惯导系统参数长期重复性的重点因素,例如对金属与金属、金属与非金属利用粘接剂连接的场合,利用温度冲击或高频振动进行稳定化处理^[6-7];整机装调方面,依据惯导系统参数时变机理及模型可获得环境应力对产品整体性能的作用规律,从而可以确定合理的高应力试验剖面和方法,实现对于产品整机的稳定化处理,例如在局部进行合理的振动,以消除装配应力^[6],从而全面强化惯导系统参数长期重复性。

在惯导系统参数时变机理及模型的支持下,上述三方面工作相辅相成,可以显著提高惯导系统的参数长期重复性,从而延长惯导系统性能保持期,减小装备使用中的标定维护工作量。

3.2 为实现惯导系统参数长期重复性快速准确测试奠定坚实基础

惯导系统参数变化具有周期长、精度高的特点,特别是随着惯导系统性能保持期越来越长,采用传统自然条件下的等时间测试方法,耗时难以承受,因此必须研究加速试验技术。同时,由于惯性器件和系统属于精密高价值产品,采取依赖于大量样本试验加统计分析的传统加速方法成本难以承受,因此必须研究基于机理的小样本加速试验方法。

以惯导系统参数时变机理及模型为基础,研究惯导系统参数加速模型建模方法,揭示性能参数与应力及时间变化的动态关系,同时研究加速机理一致性判定方法,确保高应力和自然应力条件下变化机理一致,最终可建立惯导系统性能参数加速模型,从而突破基于物理模型的惯导系统参数长期重复性加速试验的关键技术问题。

实现了基于机理的加速试验方法,可以快速、准确的检测验证惯导系统的参数长期重复性,这对于产品的研制、生产和交付具有重要意义。在研制和生产过程中,采用此方法,可以尽快准确评价各项技术措施和工艺手段对惯导系统参数长期重复性的正确性和有效性,以便于改进和验证。在产品交付过程中,可以对惯导系统参数长期重复性这项重要参数进行快速检验,加快装备的交付进度。此外,依据惯导系统参数时变机理及模型可用于分析计算产品加速试验的极限条件和加速因子等,为解决惯导系统加速贮存试验与寿命评定技术难题提供新的技术途径。

4 结论

对于惯导系统这类精密复杂的产品,适用采用基于微观过程分析的机理研究和建模方法,从根本上揭示惯导系统参数在多环境载荷作用下随时间推移发生变化的机理并建立相应的模型。在此基础上研究全面、完善的惯导系统参数变化控制技术方法以及基于物理模型的性能参数加速

试验方法,可有效解决惯导系统参数长期重复性问题,对于提高精确制导武器的作战效能和使用维护性具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 胡平华. 动力调谐陀螺稳定平台航向效应漂移研究 [D]. 工学博士论文, 2000.
- [2] 汤姆逊, 达利. 振动理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 师汉民, 黄其柏. 机械振动系统: 分析·建模·测试·对策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- [4] 曾攀. 有限元分析及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] Kong Ma, Robert Goetz, Shesh K Srivatsa. Modeling of residual stress and machining distortion in aerospace components. AFRL-RX-WP-TP-2010-4152.
- [6] S Kwofie. Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 516: 154-161.
- [7] Du Liqun, Wang Qijia. Experimental study on ultrasonic stress relief for cured SU-8 photoresist layer [J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87: 2555-2560.
- [8] IEEE standard specification format guide and test procedure for linear single-axis, nongyroscopic accelerometers [S]. IEEE STD 1293-1998, Sponsor by Gyro and Accelerometer Panel of the IEEE Aerospace and Electronic Systems Society.
- [9] Peters R B, Stoddard D R, Meredith K. Development of a 125 g quartz flexure accelerometer for the RIMU program [C] // IEEE PLANS 1998: 17-24.