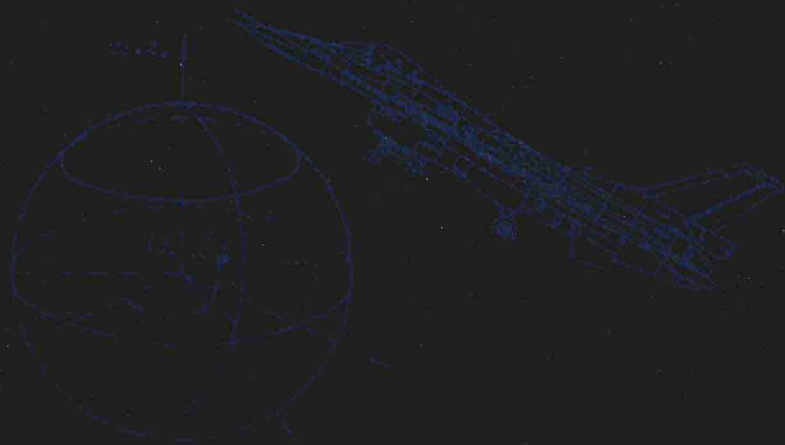


· 惯性技术丛书 ·

热作用条件下的航空、航天和航海 惯性导航系统、仪表和传感器

[俄] 维·埃·扎希托夫 (В.Э.ДЖАШИТОВ) 著
弗·米·潘克拉托夫 (В.М.ПАНКРАТОВ)

赵克勇 王同庚 译



中国宇航出版社

惯性技术丛书

热作用条件下的航空、航天 和航海惯性导航系统、 仪表和传感器

[俄] 维·埃·扎希托夫 (В. Э. ДЖАШИТОВ) 著
弗·米·潘克拉托夫 (В. М. ПАНКРАТОВ)

赵克勇 王同庚 译



中国宇航出版社

Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий/В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов/Под общ. ред. академика РАН В. Г. Пешехонова. - СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2005. - 404 с. ISBN 5 - 900780 - 57 - 0.

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号: 图字: 01-2013-5173 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

热作用条件下的航空、航天和航海惯性导航系统、仪表和传感器 / (俄罗斯) 扎希托夫, (俄罗斯) 潘克拉托夫著; 赵克勇, 王同庚译. --北京: 中国宇航出版社, 2013.8

ISBN 978-7-5159-0464-1

I. ①热… II. ①扎… ②潘… ③赵… ④王… III. ① 航空导航—惯性导航系统—研究② 航天导航—惯性导航系统—研究③ 航海导航—惯性导航系统—研究 IV. ① TN966

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 176507 号

责任编辑 曹晓勇 彭晨光

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900
(010)68768541

(010)88530478(传真)
(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

北京宇航文苑
(010)62529336

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2013 年 8 月第 1 版

2013 年 8 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 12.375

字 数 332 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0464-1

定 价 48.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

《惯性技术丛书》策划委员会

总 策 划 薛晓军 王祖尧 倪志飞
策 划 人 员 陈 坚 李欣欣 王 海 齐振恒
 王 东 许玉明 王常虹 姜殿元

《惯性技术丛书》编辑部

主 任 许玉明
副 主 任 王常虹 姜殿元
成 员 伊国兴 李清华

内容简介

本书研究航空、航天和航海惯性导航系统使用的陀螺传感器的数学模型。在数学模型中，既考虑了外部和内部的温度作用，也考虑了随机的和可确定的温度干扰。建立了液浮陀螺、动力调谐陀螺、静电陀螺、固体波动陀螺、光纤陀螺、微机械陀螺、微机械加速度计和其他物理量传感器，如压力传感器、线位移传感器以及伺服电路部件的热过程和热漂移的数学模型，并对其进行了深入研究。作者对建立新的数学模型给予了特别的关注。这些新的热漂移数学模型，为研究惯性传感器、惯性仪表和惯性导航系统在非线性动态温度扰动中的表现及其无规则误差的判定提供了可能性。

本专著是在作者近年来研究工作的基础上，对 2001 年出版的《惯性系统陀螺传感器热漂移的数学模型》一书的总结、发展和补充。为了内容叙述的逻辑性和严整性，从 2001 年版书中做了相当详细的摘录，这样做不仅对专家和研究人員，而且对大学生和研究生都是有益的。此外，还可使读者了解精密测量装置热干扰问题的现状。书中介绍的方法，能够帮助读者在研制和使用航空航天航海惯性导航系统和惯性传感器时深入思考，仔细研究物理过程相互联系和相互作用的实质。

本书可供科研人員和工程技術人員参考，也可用作高等院校大学生和研究生参考书。

绪 论

毫无疑问，所有这一切都是引人入胜的，值得阅读的。

——B·索罗古伯《四轮马车》

本书是作者 1998 和 2001 年出版的两本著作^[16,18]的总结、扩充和发展。内容涉及受温度干扰的惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统数学模型的建模和研究。

时间不会停滞不前。最近几年，在航空、航天、航海和其他仪表制造领域发生了重要的变化。

这些变化既涉及高精度、小体积、低功耗的惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统的设计和生产，也涉及该领域专门人才的培养问题。

以作者的观点看，现代微机械和二维工艺取得的成就，以及现代方法和计算机技术的应用，使我们能够顺利解决这些问题。因此，作者用近几年新的研究成果，对本书做了补充和发展。本书的特点之一是，所有的方法和结论都可以推广应用到航空、航天、航海用的惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统以及其他仪表制造业。

作者力图将得到的理论成果变成实践中完善这些惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统的具体意见和建议。这正是本书与众不同的地方。做到没有，请读者判断。

这本书的实质是什么

现代航空和航天飞行器能够顺利地工作并解决复杂的技术问题，是因为在它们上面安装有导航与控制系统。

导航与控制系统的基础是惯性信息传感器、导航仪表和其他物理量传感器以及专用的电子部件。

对“惯性信息”这个专用术语，我们的理解是：关于运动载体运动的信息数据和角位置的信息数据，以及关于运动载体质心相对惯性坐标系运动和位置的信息数据，或者用某种已知方式与惯性坐标系相连的运动载体的另一个计算坐标系运动和位置的信息数据之总和。

在运动载体上自主获得惯性信息的传感器，即根据物理定律反映载体运动的传感器，叫做惯性信息传感器或惯性传感器。

必须指出，惯性传感器是极其重要的传感器，但远不是运动载体控制系统唯一的传感器。惯性传感器同其他元器件、仪表（其中包括非自主式传感器）和电子部件一起，解决和完成各种各样的任务。

这些任务包括导航（确定运动载体质心的运动和地理位置）、定位（确定运动载体的角位置和绕其质心的位置）和控制（稳定在给定的位置，按给定程序运动，进入给定区域等）。

这些传感器还可以作为非自主系统辅助信息源或备用信息源使用，例如，卫星导航系统。最典型的例子是美国的全球定位系统（Global Position System, GPS）和俄罗斯的全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GLONASS）。

如参考文献 [16, 18] 所述，我们把所有的惯性信息传感器，按其功能特征分为下列 3 组。

第 1 组：构成特殊方位的陀螺仪表，即构成所谓基准坐标系的陀螺仪表。在运动载体上，利用陀螺仪表模拟与惯性系统对应轴平行的计算坐标轴。无论运动载体如何机动，这些轴都能保持自身在惯性空间的定位。运动载体位置的确定，是通过与载体固联的读数系统的角位置与所建基准坐标系的角位置进行比较实现的。

第 2 组：测量用陀螺仪。在这些惯性信息传感器中，运动部件在地理坐标系中（或其他基准坐标系中）不保持固定不变的位置。陀螺的运动部件与壳体相连，再通过壳体用弹性或准弹性部件与安装陀螺的运动载体相连。也可以通过连接产生与相对速度成正比的

力矩或者与载体绕某个测量轴的转角成正比的力矩。这种连接保证陀螺与载体一起旋转。在这种情况下,载体与陀螺部件之间的相对失调角与运动载体的被测参数(转角或角速度)成正比。

第3组:加速度计。加速度计用来测量运动载体的视在加速度(绝对加速度与重力加速度之差)。加速度计分为线加速度计(轴向加速度计)和摆式加速度计。在线加速度计中,载体的加速度是根据惯性质量沿加速度计敏感轴的偏差确定的。在摆式加速度计中,加速度是根据摆的偏转角求出的。通常,陀螺和加速度计工作在采用万向支承的平台式惯性导航系统中或者捷联式惯性导航系统中。

在捷联式惯性导航系统中,万向支承的角色由机上计算机扮演。这些系统完成运动载体的导航、定位和控制任务。

运动载体的加速度和角速度是惯性导航系统的输入值。加速度和角速度由传感器——加速度计和陀螺仪测量。加速度计和陀螺仪通常安装在陀螺稳定平台上。陀螺稳定平台将加速度计和陀螺仪保持在相对惯性坐标系或地球坐标系确定的位置。测出的加速度和角速度进行必要次数的积分,在考虑初始条件和一系列修正值的情况下,在输出端得到瞬时角坐标和线坐标以及运动载体的速度。

除惯性传感器(陀螺仪和加速度计)之外,在航空、航天、航海运动载体控制系统的组成中,还包括绝对压力传感器、剩余压力传感器、快速压力变化传感器、声压传感器、测量变形用的传感器、线性位移传感器,以及建立在这些传感器基础上的测量仪表和系统、诊断仪表和系统、应急保障仪表和系统。

数千种不同类型的传感器和由它们组成的航天器曾经和正在用于一些闻名的苏联/俄罗斯和国际航天计划,例如:东方号,联盟号,宇宙号,和平号,质子号,能源-暴风雪,联盟-阿波罗,海上-发射,国际空间站,光子-M和许多其他计划。

在极端恶劣的使用条件下(宽的温度范围、温度冲击、强烈的振动和冲击、大的线加速度、各种腐蚀性介质的作用等),对于现代传感器、惯性仪表和惯导系统,最迫切的任务是达到高精度和测量

的可靠性,还要具有质量小、体积小、耗能小的特性,以及多功能和性价比合理等优点。

另一方面,现代航空航天精密仪表制造业,其中包括运动载体导航、定位和控制系统使用的仪表制造业,最重要的发展方向之一,就是完善使用高速旋转转子的“经典”陀螺,并在它们的基础上研制新型惯性信息传感器、陀螺仪表和惯导系统。在这一工作中,现有惯性传感器的完善和新型惯性传感器的创建都最大限度地采用了各种物理原理和过程,以及它们的组合。这也是该项工作的最基本特征。

这里包括采用动压液浮和静压液浮支承、电磁定心、多级和多区域温控的液浮惯性传感器;转子振动动力调谐惯性传感器;具有高速旋转球形转子的无接触支承静电陀螺;固体波动陀螺;微机械陀螺;光纤陀螺等惯性传感器,以及许多其他类型的陀螺和系统。

陀螺的工作效率和精度在很大程度上取决于各种物理过程(机械的、弹性的、热弹性的、流体力学的、电磁的、静电的、光学的、热的等)的相互影响。正是这些物理过程保证了这些陀螺的功能。特别重要的是,对陀螺传感器及惯性导航和定位系统的精度要求越来越高。例如,对现代精密导航系统“漂移”的要求为每小时百分之几度、千分之几度,甚至更小[比较一下,地球自转角速度为 $15(^{\circ})/h$]。

生产如此精密的陀螺传感器,必须进行深入的、综合性的理论研究。研究机理不同的各种物理过程的相互影响及其特点,考虑这些陀螺传感器工作所处的外部环境的影响。其中一个非常重要的影响惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统精度及工作效率的因素就是:复杂的、无规则的、随机的温度作用。

为了解决多种类型惯性信息传感器和其他物理量传感器,精密仪表和运动载体导航、定位、控制系统的设计和生 产、分析与综合问题,同时充分考虑温度的作用,制定一个统一的理论和方法,并通过数学算法和程序软件来实现,是非常重要和有意义的。

在陀螺系统非线性扰动理论中, 研发一种新的途径是有相当重要的意义的。这种新途径就是, 在飞行器的有序运动中, 确定陀螺系统输出信号中可能产生的无规则现象。从这一观点出发, 进一步研究陀螺系统。

本书研究的对象是:

1) 受温度干扰的各种初始惯性信息传感器(液浮陀螺、动力调谐陀螺、静电陀螺、固体波动陀螺、光纤陀螺、微机械陀螺、微机械加速度计), 电子部件, 航空、航天和航海仪表, 导航、定位和控制系统。

2) 用于航空航天技术的, 受温度干扰的压力传感器和线位移传感器。

3) 发生在这些惯性信息传感器、陀螺装置和系统中的相互关联的物理过程(力学的、弹性的、热弹性的、流体动力学的、电磁的、静电的、光学的、热学的和某些其他过程)以及它们之间的相互联系及其特点。

读完这本书后, 你将获得什么知识

你将获得现代陀螺仪和加速度计的最新概念。它们的作用原理是建立在各种物理原理和力学、电气机械学、弹性理论、热弹性理论、光学、非线性动力学等定律基础上的。

你将获得研究其工作性能的方法和手段, 并考虑其工作介质的影响, 其中包括复杂的温度作用及其影响。

书中阐述了对处于不同工作介质中的惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统分析与综合的科学基础。在这里, 温度的作用不像通常那样受到限制, 而是以热过程和物理过程相互联系、相互作用的形式出现。而这种相互联系和相互作用, 正体现了这种或者那种传感器的特性。

最终, 你将获得惯性信息传感器和其他物理量传感器非线性动态温度干扰系统的理论和概念。这是一个新课题, 也是一种新途径。这种新途径是从热分析的角度研究这些系统, 即在这些系统的输出

信号中可能产生温度扰动引进的可判定无规则信号。

不同工作原理的惯性传感器其结构的复杂性，传感器内部物理过程的多样性与关联性，传感器构成零部件的多样性，以及其各不相同的外部工作环境和频带，决定了这本书需具备超强的综合性能。本书讲述的惯性传感器理论研究方法、计算方法和性能分析方法具有广泛的实用价值。

在本书撰写过程中，作者力图做到，使现代数学的形式，不仅不会使问题变得复杂，相反，能够最明显、最大限度地反映所研究的惯性信息传感器、陀螺仪表和惯导系统中的物理过程及其本质。

书中内容是这样叙述的：先阐述物理作用原理各异的陀螺传感器，其他物理量传感器，伺服电路，航空、航天、航海仪表数学模型建模和研究的一般途径和原则；然后，把所阐述的途径和方法应用于受到温度干扰的各种类型陀螺传感器、其他物理量传感器、专用伺服电路、惯性仪表和惯导系统数学模型的建模和研究，并在此基础上提出改进和完善结构的实际建议。

本书是作者另外两本书^[16,18]的发展和补充。

目 录

第 1 章 惯性传感器、陀螺仪表、惯导系统中的热过程和机械过程的数学模型及其研究方法	1
1.1 惯性传感器、陀螺仪表、惯导系统中的三维不稳定不均匀温度场的综合分析和计算方法	1
1.2 考虑其结构零件相对运动的动态特性时, 惯性传感器、陀螺仪表、惯导系统不稳定温度场的分析计算方法和直观化	22
1.3 惯性传感器、陀螺仪表、惯导系统独特的机械运动过程的数学模型及其研究方法	45
第 2 章 受到温度干扰的惯性信息传感器	74
2.1 热作用条件下的液浮陀螺	74
2.2 热作用条件下的动力调谐陀螺	93
2.3 热作用条件下的静电陀螺	111
2.4 热作用条件下的固体波动陀螺	122
2.5 热作用条件下的微机械陀螺和微机械加速度计	138
2.6 热作用条件下的光纤陀螺	186
2.7 惯性传感器温度干扰数学模型的系统化	213
第 3 章 建立和研究受温度干扰的航空航天传感器、仪表和系统数学模型的特殊任务	222
3.1 受温度干扰的航空航天传感器、仪表和系统输出信号中奇特的可判定无序现象	222

3.2	受温度干扰的测量陀螺和阻尼陀螺动态系统中 的可判定无序现象	236
3.3	在液浮支承间隙中产生黏性液体不等温无序运 动的可能性	255
3.4	航空航天仪表微机械传感器可逆温控系统和加 温温控系统	272
3.5	受干扰数学摆的非线性运动	288
3.6	参数变化对机械系统固有特性的影响	304
第4章	航空航天飞行器定位系统中受到温度干扰的压力传感器、 线位移传感器、仪表和电子控制部件	313
4.1	热作用对航空航天飞行器压力传感器的影响	313
4.2	温度冲击条件下的航天飞行器线位移传感器	327
4.3	热作用条件下航天飞行器定位系统的多功能 可编程序控制器	340
4.4	热作用条件下航天飞行器定位系统的电子部件	349
第5章	结论	375
	参考文献	378

第1章 惯性传感器、陀螺仪表、 惯导系统中的热过程和机械过程的数学模型 及其研究方法

1.1 惯性传感器、陀螺仪表、惯导系统中的三维不 稳定不均匀温度场的综合分析和计算方法

在建立和研究惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统的温度扰动数学模型时，产生两个基本问题^[16,18]：

1) 通常情况下，要计算和分析的惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统的温度场是一个三维的、不稳定的、不均匀的温度场。

2) 要建立和研究的数学模型是一个相互关联的数学模型，既是惯性传感器、陀螺仪表、惯导系统工作的数学模型（包括机械运动方程的推导），也要考虑温度对它们的干扰因素和热漂移。

对以上问题的分析表明，它们之间存在一定的相互联系^[16,18]，我们可以构思一个统一的，能够解决所有不同类型和级别的惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统问题的通用方法。

研究工作从陀螺仪表或者惯导系统的基本结构开始。按等级原则从大到小进行（从系统、部件到组成它们的组件、零件）。

建立陀螺传感器及其零部件热过程的数学模型，考虑热过程的特点及其发生的物理过程。一般情况下，计算和分析时必须考虑，在给定计算点，陀螺仪表的温度场是三维的、不均匀的、不稳定的。

根据惯性信息传感器的种类、工作原理，以及它们的物理现象和物理过程的特点，建立干扰因素和热漂移的数学模型。在数学模型中温度场的性能是输入数据。

利用我们制定的方法,对数学模型、算法和程序软件,进行计算机仿真实验,对所建数学模型进行自动化的、直观的、定性和定量的分析。在分析的基础上,必要时,按温度漂移最小化的原则,解决综合问题。进行有效的结构变化,采用算法补偿,进行惯性信息传感器、仪表、电子部件或者温控系统参数的最佳化。根据综合的结果,提出对惯性信息传感器及其零部件和温控系统结构、算法和其他性能的改进意见。

上述统一构思和解决问题的方法可以用相互关联的闭合框图表示,如图 1-1 所示。

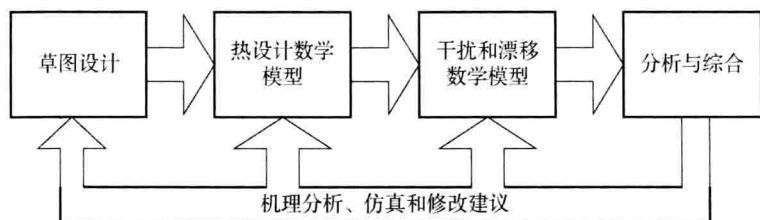


图 1-1 研究方法框图

这种解决问题的综合方法,在惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统温度扰动理论中是必要的,因为现代仪表制造技术包含了多种多样的传感器、仪表、电子部件和系统。它们的工作原理不同,在其内部发生的物理过程又是相互关联的。

简单讨论该方法的几个特点。这些问题的复杂性和相互联系决定了,除采用传统的惯性传感器、陀螺仪表和惯导系统研究方法外^[29],在解决问题时,必须采用热状态计算方法^[23]、弹性理论和热弹性理论方法^[31]、流体力学^[36]、振动理论和光学等方法。

特别是陀螺系统温度扰动的非线性,在其内部发生的物理过程本质的多样性,以及这些物理过程之间的相互联系,决定了必须采用以前研究惯性传感器从来没有采用过的一些方法。例如,动态系统无规则信号判定通用理论方法^[47]。

惯性信息传感器、陀螺仪表、惯导系统、电子部件等均可看成

是一个复杂的动态系统。该动态系统是由数量有限的 N 个零件和介质以某种方式组成的。在这个系统中热交换过程具有推定随机的、复杂的传导、对流和辐射性能的功能。

描述这种具有分布参数系统机械运动和热交换过程的数学模型，在其物理过程的特点确定的情况下，通常为普通代数方程组、微分方程组和偏导数方程组^[16,18]。

机械运动方程组为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}(T_i)F(\mathbf{X}) + \mathbf{B}(\mathbf{X}, T_i, \dots) \quad (1-1)$$

能量（热质传递）方程组为

$$c_{ij}\rho_{ij} \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + k_1 \mathbf{V}_j \nabla T_i \right) = \nabla (\lambda_{ij} \nabla T_i) - k_2 (3\lambda_i^* + 2\mu_i^*) \alpha_{Ti} T_{0i} \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{U}_i}{\partial t} + k_3 \mathbf{Q}_i^{\text{ac}} + \mathbf{Q}_i^y \quad (1-2)$$

不可压缩黏稠介质不等温运动纳维—斯托克斯方程组在奥韦尔别克—布西内斯克逼近时（当仅在质量力中考虑参数与温度的关系时）为

$$\frac{\partial \mathbf{V}_j}{\partial t} + (\mathbf{V}_j \nabla) \mathbf{V}_j = - \frac{\nabla P_j}{\rho_{0ij}} + \nu_j \nabla^2 \mathbf{V}_j + \mathbf{g} \beta_{Ti} T_i \quad (1-3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{V}_j = 0 \quad (1-4)$$

运动中的热弹性动态方程组为

$$\rho_{ii} \frac{\partial^2 \mathbf{U}_i}{\partial t^2} = \mu_i^* \nabla^2 \mathbf{U}_i + (\lambda_i^* + \mu_i^*) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{U}_i - (3\lambda_i^* + 2\mu_i^*) \alpha_{Ti} \operatorname{grad}(T_i - T_{0i}) \quad (1-5)$$

状态方程组为

$$\rho_{ij} = \rho_{ij}(T_i, P_j) \quad (1-6)$$

在式 (1-1) ~ 式 (1-6) 中符号含义如下所示。

$\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_m\}$ —— 传感器、仪表或系统力学状态的 m 维矢量；

$\dot{\mathbf{X}} = \{\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_m\}$ —— 传感器、仪表或系统力学状态的时间导数；

$T_i(x, y, z, t) (i = 1, \dots, N)$ —— 仪表零件和携热介质的温度场；

$\mathbf{V}_j(x, y, z, t) (j = 1, \dots, N_*)$ —— 携热介质的速度矢量场；

$U_i(x, y, z, t)$ —— 仪表零件变形时的位移矢量场；

$P_j(x, y, z, t)$ —— 介质中的压力场；

$A(T_i)$ —— 表征传感器散逸性、弹性、惯性、几何参数和其他性能的系数矩阵；

∇ —— 那勃勒算子；

$B(X, T_i, \dots)$ —— m 维输入和干扰矢量；

∇^2 —— 拉普拉斯算子；

c_{ij} —— 比热；

ρ_{ij} —— 密度；

λ_{ij} —— 导热系数；

ν_{ij} —— 运动黏度；

α_{Ti} —— 温度线膨胀系数；

β_{Ti} —— 温度体膨胀系数；

ρ_{0ij}, T_{0i} —— 介质和零件的额定密度和额定温度；

λ_i^*, μ_i^* —— 拉梅系数；

t —— 时间；

g —— 重力加速度；

Q_i^{nc}, Q_i^y —— 散热（致冷）器件和温控系统热源的换算功率；

下标 j —— 在热物理参数中表示液体或者气体介质；

下标 i —— 在热物理参数中表示固体材料；

k_1, k_2, k_3 —— 反映发生在传感器、仪表和系统中的物理过程及其相关性能的系数，通常为 0 或 1。

在研究具体传感器、仪表和系统时，需要在式 (1-1) ~ 式 (1-6) 中补充初始条件和边界条件，并考虑其安装固定特点和它们与外部的热交换，还要补充表征惯性传感器作用原理的特殊方程和关系式。

虽然不可能用解析方法解决这样复杂的问题，但我们推荐的广义命题，使我们在建立和分析作用原理不同的传感器、仪表和系统的热过程数学模型、温度干扰因素数学模型和温度误差数学模型时，