

高稳定I/F转换SiP系统集成技术研究

孙函子^{1,2}, 班郁³, 何一蕾¹, 黄震¹, 金远卓¹, 庄永河^{1,2*}

¹微系统安徽省重点实验室, 安徽 合肥

²中国电子科技集团公司第四十三研究所, 信号处理研究部, 安徽 合肥

³中国电子科技集团公司信息科学研究院, 微系统集成研究部, 北京

收稿日期: 2026年9月6日; 录用日期: 2026年9月22日; 发布日期: 2026年10月30日

摘要

针对惯导系统对微小加速度传感信号检测的高稳定性及小型化需求, 本文研究一种I/F SiP微模组的系统集成技术。基于混合集成工艺和复合陶瓷材料体系, 设计了一种包含薄膜电阻和温度补偿电阻配对架构的高精度电流频率转换电路, 可将传感器输出的 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ A信号转换为数字信号; 同时提出了一种新的LTCC+HTCC双材质多腔体一体化PiP结构, 可实现电流积分、比较单元、高精度恒流源、扩流单元和开关单元等不同功能电路的异构集成和分腔布局。该方案实现了微弱加速度信号的高稳定检测, 试验结果表明, 该SiP正路输出稳定性可达14 ppm, 负路可达25 ppm, SiP体积减小为原系统的13%, 解决了惯导系统小型化、轻量化设计中的关键技术问题。所提出的集成技术方案可为同类高精度加速度传感微模组、数字化电流检测微模组等系统集成提供参考。

关键词

电流频率转换, 微系统集成, PiP, 薄膜电阻

Research on High-Stability I/F Conversion SiP System Integration Technology

Hanzi Sun^{1,2}, Yu Ban³, Yilei He¹, Zhen Huang¹, Yuanzhuo Jin¹, Yonghe Zhuang^{1,2*}

¹Anhui Key Laboratory of Microsystems, Hefei Anhui

²Signal Processing Research Department, The 43rd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui

³Microsystem Integration Research Department, Information Science Academy of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing

Received: September 6, 2026; accepted: September 22, 2026; published: October 30, 2026

*通讯作者。

文章引用: 孙函子, 班郁, 何一蕾, 黄震, 金远卓, 庄永河. 高稳定 I/F 转换 SiP 系统集成技术研究[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(5): 302-313. DOI: 10.12677/aepe.2026.145030

Abstract

To address the requirements for high stability and miniaturization in the detection of micro-acceleration sensing signals by inertial navigation systems, this study investigates an integrated system technology for an I/F SiP micro-module. Utilizing hybrid integration processes and a composite ceramic material system, a high-precision current-to-frequency conversion circuit featuring a paired architecture of thin-film resistors and temperature-compensation resistors was designed, capable of converting sensor output signals ranging from 10^{-10} to 10^{-12} A into digital signals. Concurrently, a novel LTCC + HTCC dual-material, multi-cavity, integrated PiP structure is proposed, enabling the heterogeneous integration and compartmentalized layout of diverse functional circuits, including current integration, comparison units, high-precision constant current sources, current expansion units, and switching units. This scheme achieves highly stable detection of weak acceleration signals. Experimental results demonstrate that the output stability of the SiP reaches 14 ppm for the positive channel and 25 ppm for the negative channel, while the SiP volume is reduced to 13% of that of the original system, thereby resolving critical technical challenges in the miniaturization and lightweight design of inertial navigation systems. The proposed integrated technology provides a valuable reference for the system integration of similar high-precision acceleration sensing micro-modules and digital current detection micro-modules.

Keywords

Current-to-Frequency Conversion, Microsystem Integration, PiP (Package-in-Package), Thin-Film Resistor

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 导航系统高精度、小型化已成为无人机、智能车载系统等高端装备发展的核心趋势, 微系统集成已成为小型化设计的关键[1]-[3]。在高精度惯导系统中, 需要将加速计传感器输出的微弱电流信号 (10^{-10} ~ 10^{-12} A) 转换为数字信号, 以便后级 CPU 或 FPGA 等进行处理。因此, 需要设计高稳定度的转换电路实现模拟电流信号到数字频率信号的转换。

目前, 航天二院、中航工业、北京航空航天大学、中北大学等研究机构在电路上多采用 A/D 转换实现加速度信号的数模转换, 集成设计方面则多基于 PCB 基板和 SMT 工艺实现转换电路模块, 该类方案受量化位数限制转换精度较低, 电压信号受噪声影响大, 同时存在集成体积大、分布参数和阻抗损耗高等问题, 难以满足下一代高精度惯导对输出稳定性和小体积集成的要求[4][5]。为解决上述问题, 航天三院、航天九院、青岛智腾、哈尔滨工程大学等研究机构设计电流/频率(I/F)转换方案实现加速度信号的数模转换[6][7], 电流信号传输抗干扰能力强, 可提高数字化转换精度和输出稳定性, 但系统集成仍延续传统 PCB 集成, 模块体积大、传输损耗高等问题未得到根本解决。

为满足新型高精度惯导系统和精密仪器测量系统对电流信号高稳定检测和小体积集成的应用需求, 本文提出一种基于 SiP (System-in-Package) 集成技术的 I/F 转换微模组的设计, 将积分单元、恒流源、扩流单元、比较单元、开关单元等异构电路集成在一个气密封装内; 同时通过优选漏电流低的积分电容并设计温度系数互补架构提升转换精度和稳定性。最终研制的 I/F 转换 SiP 微模组小型化集成体积为原系统

的 13%，在 50℃ 条件下两路转换输出频率稳定性均优于 25 ppm，满足惯导系统整机应用需求。

2. I/F 转换原理

电流与频率的转换方案分为 I/V/F 转换和 I/F 转换：其中 I/V/F 转换首先在反馈回路中接高阻抗电阻完成 I/V 转换，再进行 V/F 转换，具有电路结构简单，灵敏度高等特点，但对运放等元件的失调电压温度系数等指标要求严苛(通常 $\leq 10 \text{ nV}/^\circ\text{C}$)，且易受噪声干扰，无法满足高精度惯导系统要求[8]-[10]；I/F 转换方案的输入信号即为加速度传感器输出的电流信号，利用电荷平衡原理实现模拟信号到数字信号的转换，可对输入信号进行连续测量，不存在信息丢失的问题，具有输出稳定性高，噪声抑制能力强等特点，但电路结构复杂。

为了满足高精度导航系统对高稳定转换电路的需求，本文采用电流积分型 I/F 转换实现加速度传感信号的模/数转换，其电路原理框图如图 1 所示。I/F 转换微模组主要由电流积分、比较电路、扩流电路、高精度恒流源电路、开关电路和逻辑控制与触发电路共同构成。

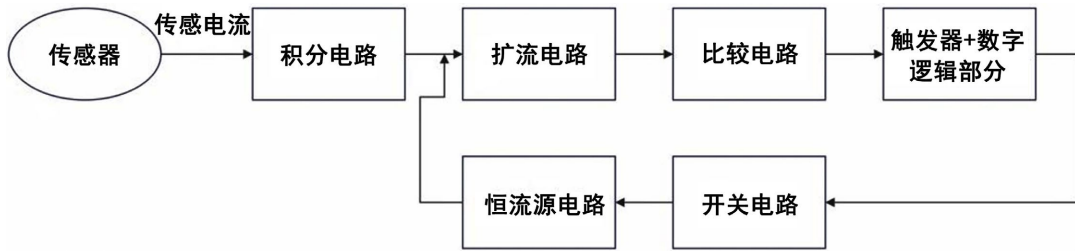


Figure 1. Schematic diagram of I/F conversion micro-module circuit

图 1. I/F 转换微模组电路原理框图

设加速度计输出电流为 I_1 ，忽略运放的失调电流和偏置电流的影响，根据电荷平衡原理可知积分电流如下：

$$I_c = I_1 - I_f \quad (1)$$

其中， I_c 为积分器反馈电流； I_f 为量化脉冲电流，脉冲电流是开关控制下恒流源的输出。

由于运放输入阻抗很大，忽略运放输入端电压，积分器输出电压 U_{j0} 与 I_c 的积分成正比：

$$U_{j0} = \frac{1}{C} \int_0^T I_c dt = \frac{1}{C} \int_0^T (I_1 - I_f) dt \quad (2)$$

$$Q_j = \int_0^T I_1 dt - \int_0^T I_f dt \quad (3)$$

其中， Q_j 为积分器储存的电荷，即惯性传感器输出总电荷与同一时间内输入积分器的量化脉冲总电荷之差。

设在 T 时间内开关接通的次数为 N 次，每次输出的量化脉冲电荷为 q ，则量化脉冲总电荷为：

$$Q_f = \int_0^T I_f dt = Nq \quad (4)$$

由方程(3)和(4)可得：

$$N = (Q_1 - Q_j) / q \quad (5)$$

即：开关的接通次数 N 正比于积分器输入总电荷和积分器存储总电荷之差。当 $Q_1 \gg Q_j$ 时， N 正比于输入总电荷，即单位时间内的输入总电流，开关频率 $f = dN/dt$ 也正比于输入总电流，即完成了传感器输

出电流与 I/F 输出频率间转化, 实现了对传感器信号的数字化。

高精度惯导系统中加速度的测量精度受加速度计头 and I/F 转换微模组精度的影响, 只有提高 I/F 转换微模组的精度才能保证加速度计的高精度输出。由原理分析可知, 积分电路和恒流源电路是 I/F 转换微模组的核心电路和设计关键。

3. 高稳定惯导 I/F 转换电路的设计

3.1. 积分电路设计

积分电路的输出精度和线性度与 I/F 最终输出精度与线性度密切相关。积分电路中的运放作为密勒积分器工作, 反馈电容 C 作为积分电容, 积分运放输出电压是对输入电流的时间积分。积分电路设计如图 2, 其中积分电容可等效为理想电容 C_f 和漏电阻 R_f ; 运放的输入阻抗和输入电容分别为 R_i 和 C_i 。

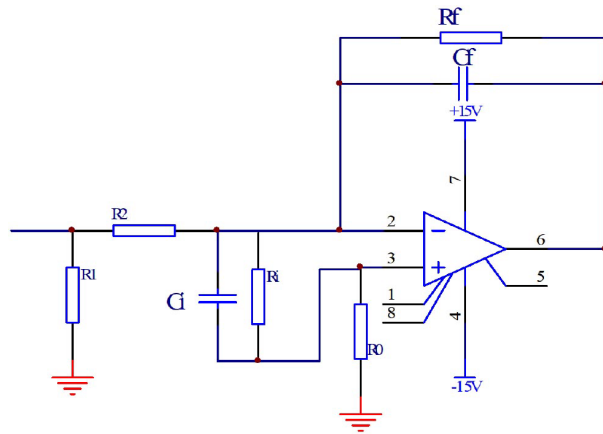


Figure 2. Integral circuit
图 2. 积分电路

假设运放和电容为理想器件, 则积分电路输出电压公式如下:

$$U_0 = \frac{R_1}{(R_1 + R_2)C_f} \int_0^T Idt \quad (6)$$

实际中, 可选器件均非理想器件, 积分电容的漏电阻、运放的失调电压、失调电流及器件的温度漂移等非理想因素将导致积分误差, 降低系统检查的精确性。

根据密勒效应, 积分电容和漏电阻可等效到运放输入端, 分别为 C_d 和 R_d , 运放的开环增益为 A_0 , 则有 $C_d = (A_0 + 1)C_f \approx A_0 C_f$, $R_d = R_f / (A_0 + 1) \approx R_f / A_0$ 。

积分电路的拉普拉斯方程如下:

$$U_0(s) = -A_0 \frac{R_1 I(s) \times (R_i \parallel R_d \parallel 1/s \cdot C_d)}{(R_i \parallel R_d \parallel 1/s \cdot C_d) + R_1 + R_2} = -\frac{R'' I(s)}{1 + R' \cdot C_d \cdot s} \quad (7)$$

其中, $R' = (R_1 + R_2) \parallel R_i \parallel R_d$, $R'' = A_0 R_1 R' / (R_1 + R_2)$ 。

设积分器输入电流为单位阶跃信号, 则公式(7)的时域响应输出如下:

$$U_0(t) = -\frac{R''}{R'} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (8)$$

其中, $\tau = C_d R'$ 。将公式(8)按迈克劳林级数展开(前两项):

$$U_0(t) = -\frac{R''t}{R'\tau} \left(1 - \frac{t}{2\tau}\right) \quad (9)$$

非线性误差如下:

$$\delta = \frac{t}{2\tau} = \frac{t}{2[(R_1 + R_2) // R_i // R_d]C_d} = \frac{t}{2A_0(R_1 + R_2)C_f} + \frac{t}{2A_0R_iC_f} + \frac{t}{2R_fC_f} \quad (10)$$

公式(10)中的前两项分别为运放引入的非线性误差,第三项为积分电容和漏电阻引入的非线性误差。由公式(10)可知,增大运放的开环增益 A_0 和 $C_f R_f$ 值可以减小非线性误差。 $C_f R_f$ 称为漏电时间常数,因此对于积分电容的选择,应选用漏电时间常数大的电容。

在设计中,采用高输入阻抗低失调且开环增益较大的 CA3140 运放,减小运放本身带来的非线性误差的影响,提升测量线性度。积分电容考虑较大的漏电流常数,选型电容值为 $0.1 \mu\text{F}$,绝缘电阻 $\geq 10^4 \text{M}\Omega$,漏电流极小的高精度 CC 瓷介质电容(精度 $\pm 0.2\%$, $-55^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ 范围容值变化 $\leq \pm 2\%$)实现高精度积分电路,减小漏电流对输出精度和稳定度的影响。

通过公式(10)计算积分电容参数变化对积分电路输出精度的影响,其中 C_f 全温变化设定为 $\pm 2\%$,积分电路输出电压变化 0.4fV (125kHz 下); C_f 选型选用 CG 材料的电容,其绝缘电阻常温下为 $10^4 \text{M}\Omega$ (约 1.5nA 漏电流),同时考虑布线线阻,积分电路输出电压改变 $1.5 \times 10^{-9} \text{V}$,可保证精度和稳定性,满足系统指标要求。

3.2. 恒流源电路设计

恒流源为量化脉冲电荷提供恒定的电流基准,其输出精度和稳定性是保证系统高精度和线性度的关键。恒流源主要由电压基准源、采样电阻、比较放大、控制调整管等组成直流负反馈系统,通过采样电阻将调整管输出的电流转换为电压信号,电压信号与基准电压比较放大实现负反馈调整并输出恒定电流,设计如图 3。

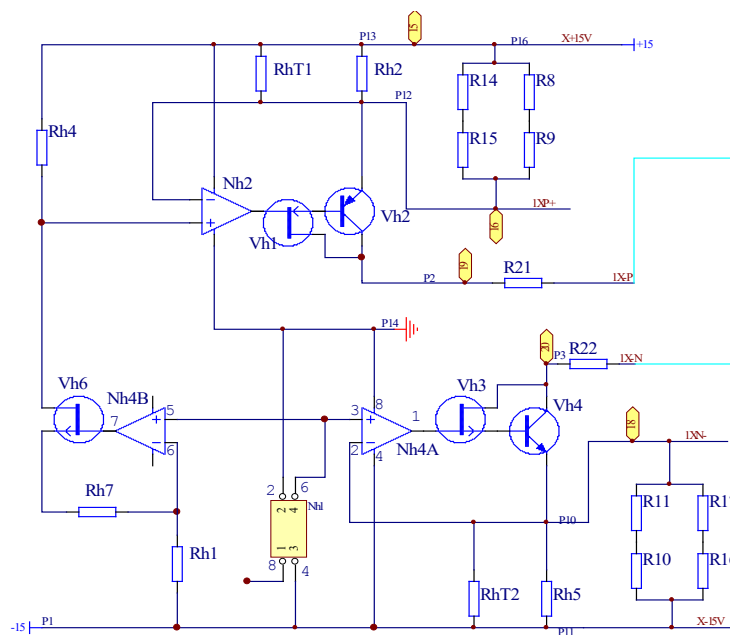


Figure 3. Schematic diagram of constant-current source circuit

图 3. 恒流源电路原理图

在恒流源电路设计中，基准源和采样电阻的设计是实现输出的精度和稳定性的关键[11]-[14]。本文设计优选基准源 MAX6325，其温度系数低至 3 ppm/℃ (-55℃~125℃)；同时设计高稳定采样电阻，通过创新的薄膜电阻和温度补偿电阻配对的架构，实现-55℃~125℃宽温范围精确采样。

以恒流源负路电流分析采样单元，采样电阻 Rh5 设计为薄膜电阻，电阻基板材料为微晶玻璃，电阻层金属导体设计为 CrNi 材料，其阻值精度可达 0.1%，温度系数典型值为 10 ppm/℃。为进一步提升恒流源精度和输出线性度，设计补偿电阻 RhT2，通过负温度系数平衡采样电阻 Rh5 的温度系数。Rh5 和 RhT2 采用并联结构互联，其温度补偿特性也遵循电阻并联原理。目标设定补偿后采样单元温度系数在 3 ppm/℃，工程计算 RhT2 温度系数应在-80 ppm/℃。本文设计负温度系数薄膜电阻，电阻层金属导体设计为 Ta₂N 材料。

具体工艺过程为：Ta₂N 薄膜电阻溅射过程中，通过控制氮(N₂)反应气体控制薄膜电阻温度系数。具体流程如下图 4，其中 N₂ 流量设计在 8~15 sccm (立方厘米每分钟)，随着 N₂ 流程增加，薄膜电阻导体材料 N 含量增加，方阻增大，温度系数负值绝对值增加。

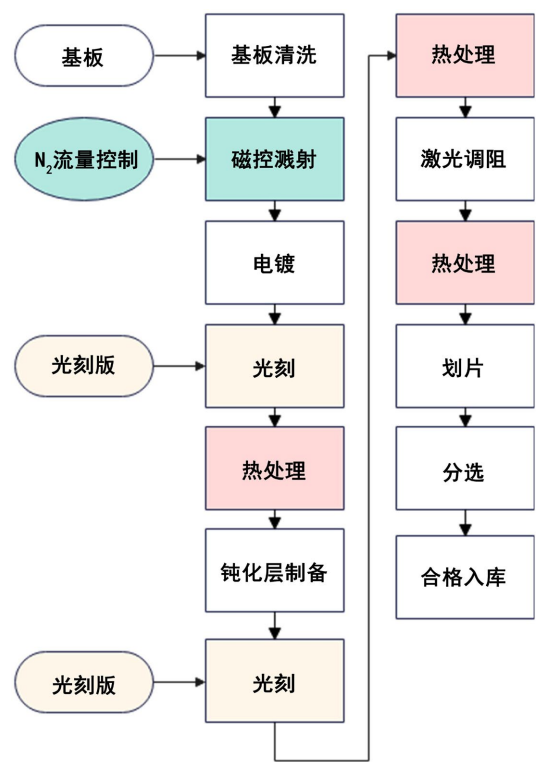


Figure 4. Preparation process flow of temperature-compensated thin-film resistor
图 4. 温度补偿薄膜电阻制备工艺流程

本文设计通过补偿电阻 RhT2 与采样电阻 Rh5 并联，测试采样单元温度系数减小为 2 ppm/℃，进一步提升了 I/F 输出的稳定性，并提升了可靠性，工作温度范围拓宽到-55℃~125℃。

4. 基于 PiP 技术的双材质一体化封装 SiP 微模组集成设计

本文研究的另一关键点是满足惯导系统对微模组小型化及可靠性的需求，项目采用 SiP 系统集成技术，设计了一种 HTCC、LTCC 多材质双腔一体化 PiP (封装内封装)封装。区别与 PoP (封装上封装)堆叠架构，PiP 采用金丝键合实现多个封装间的互连，避免了 PoP 中焊球互连方式在应力下易开裂的弊端，满

足惯导系统对 I/F SiP 微模组可靠性的需求。

本文设计了 HTCC (AlN)多腔体多层陶瓷金属一体化封装，具有气密性好、导热率高等优点[15]；在内部结构上，设计了内置多层 LTCC (Al₂O₃)双面基板和封装主体的堆叠结构，可实现强/弱信号以及低速/高速信号的分腔、分层布局，扩大组装面积，如图 5 剖面图。图 6 是总体方案结构图，分为多层 LTCC (Al₂O₃)双面板和 HTCC (AlN)陶瓷金属一体化封装两部分，最后采用平行缝焊气密封口，保证微模组可靠性。设计总体方案如下图。

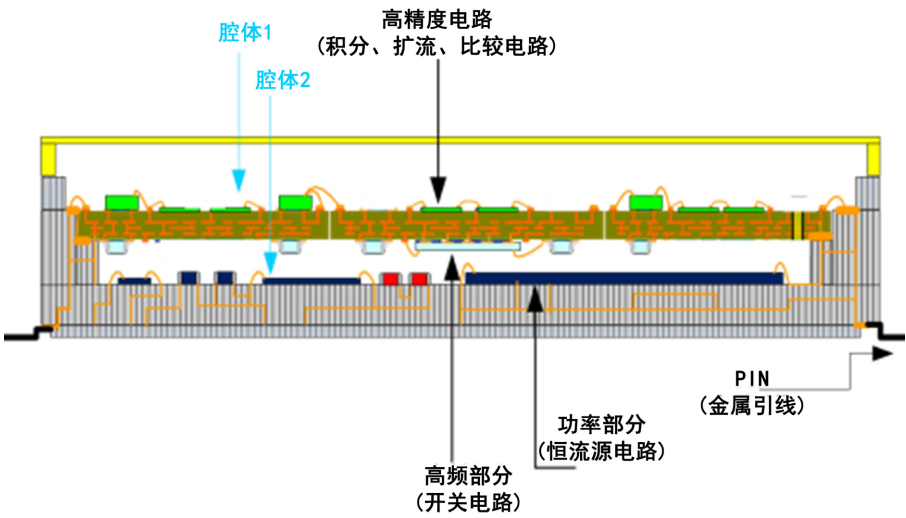


Figure 5. Cross-section schematic diagram of I/F conversion SiP micro-module
图 5. I/F 转换 SiP 微模组剖面示意图

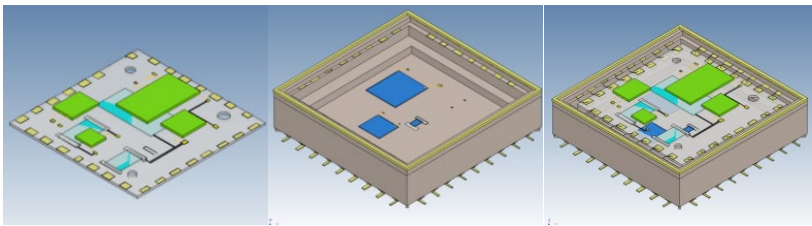


Figure 6. Schematic diagram of PiP packaging structure design
图 6. PiP 封装结构设计示意图

Table 1. Parameters of multilayer wiring
表 1. 多层布线参数

名称	导线材料	导线方阻
HTCC	层内 W/表层 Au	内部 15 mΩ
LTCC	层内 Ag/表层 Au	3~5 mΩ
厚膜	Au	3~8 mΩ
薄膜	表层 Au	15~30 mΩ
PCB	Cu	2~5 mΩ

本文在 LTCC 多层金属化双面板(Al₂O₃)和 HTCC 多层陶瓷金属一体化封装(AlN)上贴装元件并实现电气互联，可同时形成三个器件安装面，有效增加布线面积。由于 I/F 转换系统对精度、稳定性和线性度的要求，要求多层金属化基板导线方阻小且一致性好，可以降低功耗，降低功率密度，降低信号损耗，

提升精度。基于微模组的体积并通过合理布线，线阻预估如下：LTCC 内部采用银浆印制导线，通常线阻不超过 $0.3\ \Omega$ ；HTCC 内部采用钨浆，通常线阻不超过 $0.9\ \Omega$ ，可以满足积分电路和恒流源电路对高精度的需求。具体多层布线参数如表 1。

根据微模组版图设计预计线阻对微模组输出精度影响，由计算可知，线阻对输出电压的影响是 pV 级的，可以满足系统对输出精度要求。

由于微模组体积减小，相应其功率密度增加并导致微模组温升增加，温升影响系统电性能指标的精度和稳定性。温升对积分电路的影响主要集中在对电容漏电流、放大器失调电压等的影响；对开关电路的影响集中在对导通电阻、输出频率稳定性等，这些都将影响系统输出精度和稳定度；而对恒流源电路主要影响电流输出稳定性、时漂参数等，将严重影响系统输出线性度和稳定度。

设计中，采用多腔体分隔布局电路方法实现优化设计。恒流源功率部分布局远离易受温度影响的积分电路微模组等(布局在不同腔体中)，且布局在系统结构边缘(布局在下腔体边缘处)，减小热应力对整个微模组的影响；该设计布局方式也可方便地进行外部散热片的安装，可以达到较好的散热效果。

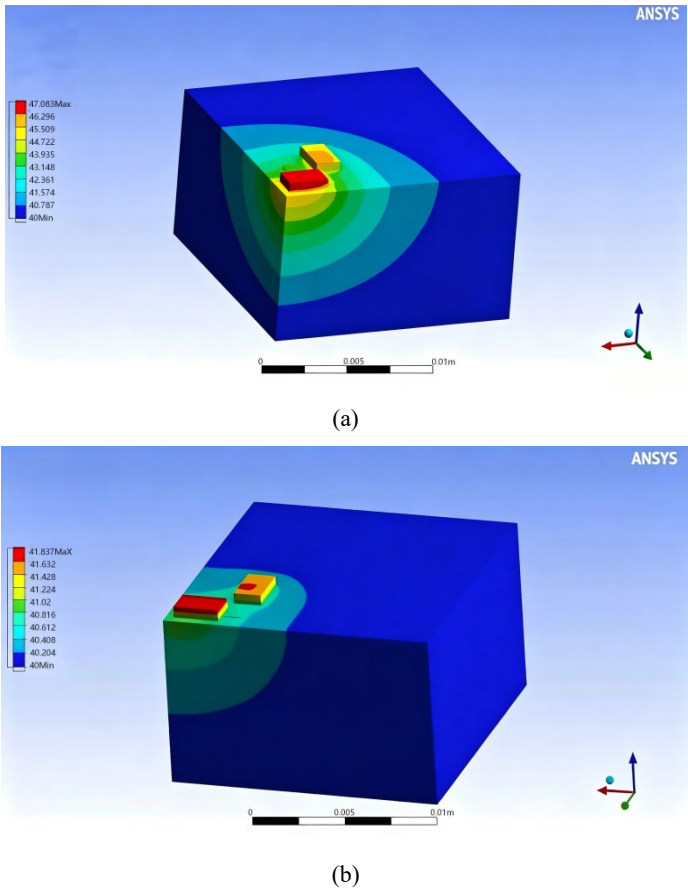


Figure 7. Thermal simulation diagrams for packages adopting different main materials. (a) Al_2O_3 substrate; (b) AlN substrate
图 7. 不同材料作为封装主体的热仿真图。(a) Al_2O_3 基板；(b) AlN 基板

设计同时考虑 SiP 封装外壳材料对整体微模组壳温变化的影响。SiP 封装常用材料的热导率包括： AlN 陶瓷为 $140\sim 230\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ ；99% Al_2O_3 陶瓷为 $33.5\sim 37\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ ；96% Al_2O_3 陶瓷为 $18\sim 21\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ 。同样条件下， AlN 与 Al_2O_3 散热比较如下仿真图 7 所示，在静止空气模型条件下，I/F 中的恒流源中主要功率元件在相同体积的 Al_2O_3 封装和 AlN 封装的散热效果， AlN 封装的温升比 Al_2O_3 封装低 6°C ，可见 AlN 材

料散热性能优于 Al_2O_3 材料。

综合考虑 I/F 集成对封装散热和芯片扇出的需求, 优选 AlN 材料作为一体化封装主体, 其散热性能优于 Al_2O_3 材料, 可实现对内部芯片扇出、电气互联和机械支持, 同时兼做散热材料, 配合外部热沉解决系统小型化过程中 SiP 微模组功率密度上升的问题。

在密闭空间静止空气条件下将 SiP 置于同一绝缘台并上电 15 min, 实际测量 SiP 壳温, AlN 材料的 SiP 壳温比 Al_2O_3 材料低 6°C 。内置多层基板采用 96% Al_2O_3 LTCC 集成积分单元等其他精密转换、高频电路并兼具高密度布线功能, 最小线宽/间距达 $60\text{ }\mu\text{m}/60\text{ }\mu\text{m}$ 。

5. 试验结果分析

本文基于 SiP 系统集成技术设计一款高精度惯导 I/F 转换微模组, 将积分电路、比较电路、高精度恒流源电路、开关电路等集成在一个双材质一体化 PiP 封装内, 利用多腔结构合理布局不同功能的电路并同时考虑封装材料优化 SiP 热设计, 微模组最终体积为 $22 \times 22 \times 8\text{ mm}^3$ 。微模组实物如图 8 所示。为了满足系统对输出精度和稳定性的要求, 积分电路部分采用高输入阻抗的运放 CA3140 和漏电流极小的高精度 CC 瓷介质电容, 以保证积分电路输出精度; 恒流源电路部分采用 MAX6325 和高精度高稳定的薄膜电阻网络及温度补偿电阻配对架构, 在减小体积的同时进一步提升微模组输出精度和稳定性。

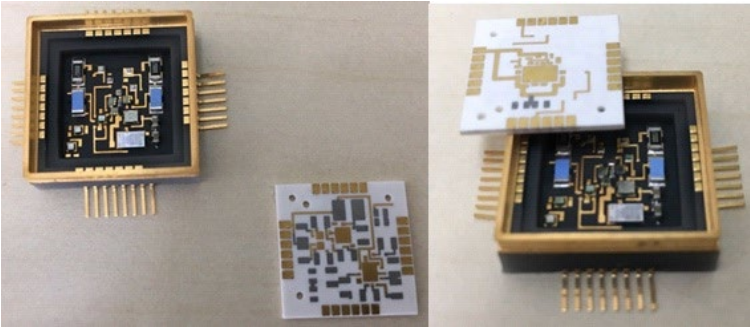
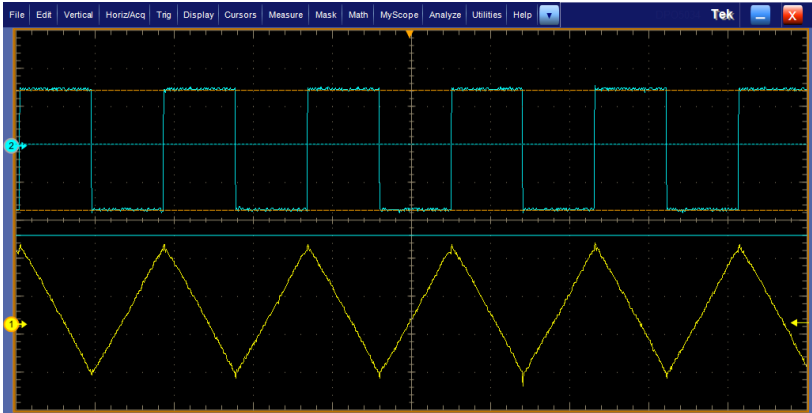
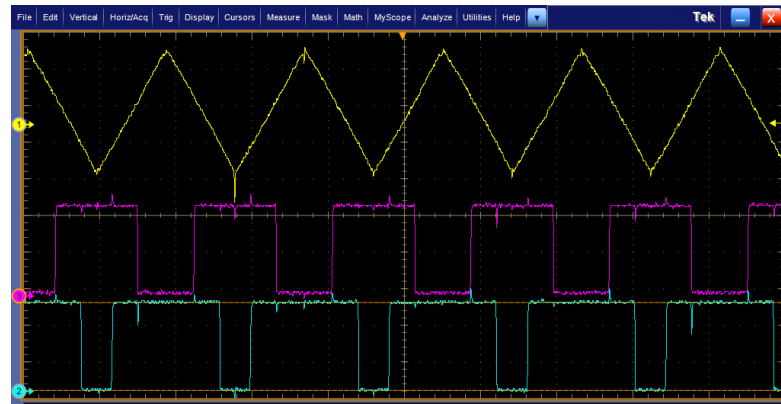


Figure 8. Physical photograph of I/F conversion SiP micro-module
图 8. I/F 转换 SiP 微模组实物图

其中积分电路部分和比较电路输出信号实测如图 9(a)和图 9(b)所示, 图 9(a)中输入方波电流信号经过积分电路输出积分三角波电压信号; 图 9(b)分别正路(输入电压为正时)和负路(输入电压为负时)比较电路的输出。由实测信号可验证积分和比较电路性能。



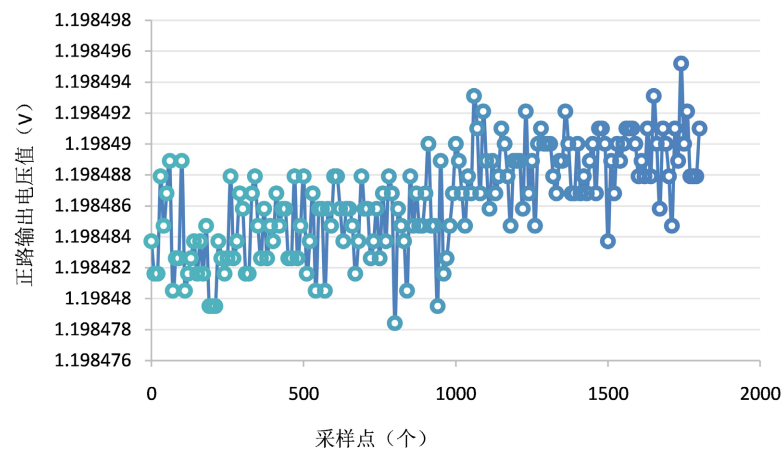
(a)



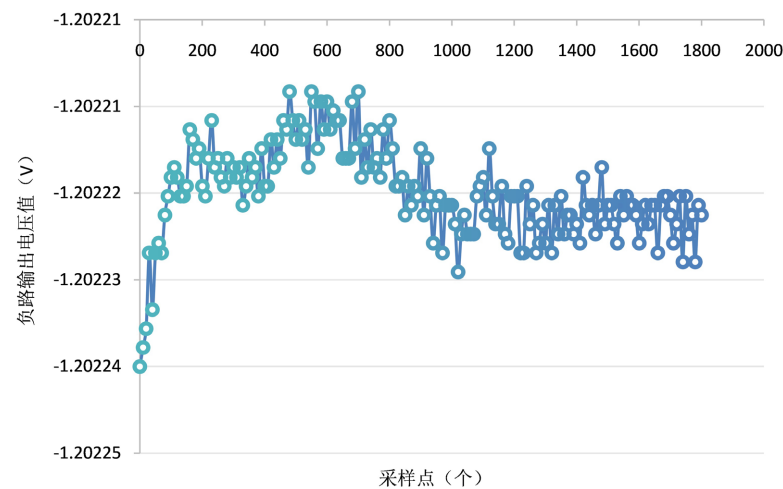
(b)

Figure 9. Measured signal waveforms of I/F conversion SiP. (a) Measured output of the integrating circuit; (b) Measured output of the comparator circuit

图 9. I/F 转换 SiP 实测信号波形。(a) 积分电路输出实测；(b) 比较电路输出实测



(a)



(b)

Figure 10. Output stability of I/F conversion SiP. (a) Measured output stability of positive channel; (b) Measured output stability of negative channel

图 10. I/F 转换 SiP 输出稳定性。(a) 正路输出稳定性实测；(b) 负路输出稳定性实测

电路输出零偏稳定性测试结果如图 10(a)和图 10(b)所示, 测试时长为 2.5 小时, 负载电阻为 100 Ω 。图 10(a)为正路输出的稳定性, 为 14 ppm, 图 10(b)为负路输出的稳定性, 为 25 ppm; 可以满足系统对稳定性指标的要求。

Table 2. Measured data and specification comparison of the I/F conversion SiP micro-module
表 2. I/F 转换 SiP 微模组实测数据及指标对比

指标 \ 模块	输出稳定性	体积	功耗	工作温度
I/F 转换 SiP 微模组 (基于混合集成)	正路输出稳定性为 14 ppm，负路输出 稳定性为 25 ppm	22 × 22 × 8 mm ³	1.5 W	−55°C~125°C
I/F 模块(基于 PCB)	正路输出稳定性为 12 ppm，负路输出 稳定性为 20 ppm	64 × 50 × 10 mm ³	2.0 W	−40°C~85°C
I/F 芯片(基于 SoC)	正路输出稳定性为 100 ppm，负路输 出稳定性为 127 ppm	10 × 10 × 1.5 mm ³	1.3 W	−40°C~85°C

由上述实验可知(见表 2), I/F 转换 SiP 微模组相较于基于 SoC 工艺的 I/F 芯片其输出稳定性更高, 其体积约为基于传统 PCB 的 I/F 模块的 13%, 输出稳定性 ≤ 25 ppm, 可满足系统小型化和高稳定性的要求。

6. 结论

本文提出并验证了一种基于混合集成技术和复合陶瓷材料体系的高稳定惯导 I/F 微模组设计方法。在电路设计层面, 创新设计了薄膜电阻和温度补偿电阻配对架构的高稳定度恒流源, 并优选超低漏电流积分电容设计高精度积分单元, 提升了微弱加速度传感电流信号的检测精度与长期稳定性。在封装集成层面, 创新设计了一种双材质、多腔体的一体化 PiP 封装结构, 可实现模拟、数字等不同功能单元的异构集成和物理分腔隔离, 降低了电磁串扰, 同时通过封装材料的梯度热匹配设计, 优化了微模组的散热路径与热应力分布, 在提升集成度的同时提升了可靠性。实验验证表明, 该微模组在精度、稳定度及体积重量等关键指标上均达到惯导系统级应用要求, 且所提出的集成方案具备良好的通用性, 可扩展至其他高精度电流感测与转换类电路的设计。

基金项目

本文获科工局稳定支持项目高精度信号转换技术研究(2GWZ2326034)支持。

参考文献

[1] 范昶. 军用高精度惯性微系统集成技术展望[J]. 电子元件与材料, 2024, 43(10): 1181-1189.

[2] 龚静, 郭茜, 樊鹏辉, 等. 微系统发展现状及其在无人装备领域应用和展望[J]. 微电子学与计算机, 2024, 41(1): 1-10.

[3] 张伟, 许俊, 黄庆龙, 等. 深空天文自主导航技术发展综述[J]. 飞控与探测, 2020, 3(4): 8-16.

[4] 郑德智, 许宁, 吴中怀, 等. 飞艇惯性导航系统加速度计的应用现状与展望[J]. 空天技术, 2023(1):77-83.

[5] 王德超. 车载光纤陀螺捷联惯性导航系统优化设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.

[6] 付昊, 李克勇, 郑国栋, 等. 一种防空导弹制导精度影响因素的定量分析方法[J]. 飞控与探测, 2020, 3(6): 103-108.

[7] 冯济琴, 邹劲松, 陈程, 等. 积分映射法 I/F 转换电路的设计与实现[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(11):326-332.

[8] 张启威, 郭涛. 一种频率/电压转换电路的设计[J]. 测试技术学报, 2020, 34(2): 137-140+146.

-
- [9] Laha, S., Dhali, J. and Gayen, P.K. (2023). Comparative Performance between V/F and Rotor Flux-Oriented Controls of Induction Motor Drive. In: *2023 IEEE Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, IEEE, 1-6. <https://doi.org/10.1109/devic57758.2023.10134999>
- [10] 屠晓伟, 高志龙, 杨庆华, 等. 基于 V/F 转换的多路信号远距离传输系统设计[J]. 自动化仪表, 2020, 41(4): 98-101.
- [11] Tarygin, I.E. (2020) Calibration of the Thermal Model of an Inertial Measurement Unit with Three Angular Rate Sensors. *Gyroscopy and Navigation*, **11**, 25-33. <https://doi.org/10.1134/s2075108720010125>
- [12] 黄武扬, 吴一, 黎坤. 基于 I/F + A/D 的高分辨率模数转换电路[J]. 仪表技术与传感器, 2020(1): 108-111.
- [13] 强冰, 王云, 黄征. 基于 FPGA 的高精度 I/F 转换电路的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(11): 73-77.
- [14] 同昭豫, 赵鹏, 黄武扬, 等. I/F 电路线性度误差分析及补偿[J]. 导航与控制, 2023, 22(6): 64-69.
- [15] 钟毅, 江小帆, 喻甜, 等. 芯片三维互连技术及异质集成研究进展[J]. 电子与封装, 2023, 23(3): 18-28.