

激光与光电子学进展

时栅传感器的技术现状、发展趋势和思想延伸

彭东林^{1,2*}¹重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400054;²时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 介绍了时栅位移传感器在 3 个方面的技术现状和 3 个方面的发展趋势, 4 项性能特色和 4 个技术应用领域的最新发展, 归纳了三代时栅演变过程; 介绍了目前的 3 种 4 类场式时栅, 以及其与传统位移传感器的联系与区别, 分析了下一代时栅可能采用的工作机理。最后, 对时空转换思想的三点延伸进行了讨论。

关键词 时栅; 位移传感器; 精密; 机械学; 电磁场

中图分类号 TH7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222617

Technological Status, Development Trend, and Thought Extension of Time Grating Sensors

Peng Donglin^{1,2*}

¹Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Chongqing 400054, China

Abstract In this study, the technological status and development trend of time grating displacement sensors are outlined considering from three aspects. Additionally, the sensors' four performance features and recent developments in four technological application areas are described. Subsequently, the evolution process for three generations of time grating sensors is summarized, and three cardinal classes and four categories of the current field-type time grating sensors are introduced, in addition to discussing their relationship with traditional displacement sensors. Moreover, the possible mechanism for next-generation time grating sensors is logically deduced and analyzed. Finally, three characteristics of the extension of the time-space coordinate transformation theory are explored.

Key words time grating; displacement sensor; precision; locomotion; electromagnetic field

1 概述

时栅概念的提出, 始于 1996 年一项有争议的国家自然科学基金“非共识项目”的申请书。其核心思想是“在相对匀速运动的两个坐标系上互相观察对方, 一方的位置之差(位移)表现为另一方观察到的时间之差”, 简称为“用时间差测量位置差”或“时间测空间”, 以此达到彻底回避超精密刻划这一国内外传统工艺、突破长期制约我国位移传感器发展技术瓶颈的重大目的^[1]。

以圆周测量为例, 对时栅原理作简要说明。图 1 中: a 点为被测的运动点, b 点为静止的参考点。以 V

匀速旋转的指针扫描, 分别扫掠到作为参考点而不动的 b 点和以 v 变速运动的 a 点时, 分别得到瞬时时刻 T_0 和 T_1 , 简单计算 V 乘以 T_1 和 T_0 的时间差 ΔT 即可获取实时的角位移量 x , 而与 v 的大小、方向无关。

因此, 若能构建一个匀速运动参考系, 对参考点 b 和被测点 a 进行持续不断的高速扫描, 不断得到二者时间差系列 ΔT_i , 便可换算得到相应的位移值系列 x_i 。而时间差可以用高频时钟脉冲计数来实现, 因此可将高频时钟脉冲序列看作是一个“时间栅”。

一个更通俗的实例: 指针式挂钟。匀速运动的指针将时间与空间联系在一起, 一段时间差被表现为一空间差(夹角), 夹角越大, 代表时间差越大。指针

收稿日期: 2022-09-23; 修回日期: 2022-10-18; 录用日期: 2022-10-20; 网络首发日期: 2022-10-30

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(51827805)

通信作者: *pdl@cqut.edu.cn

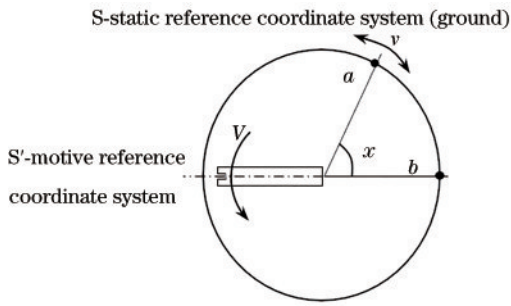


图 1 机械式时栅传感器测量原理

Fig.1 Measurement principle of mechanical time grating sensor

(时针、分针和秒针)的转速决定了这种转换的当量或称权重。时栅正好相反,借助于内部建立的匀速运动坐标系,时栅把一段空间位置之差(位移)表现为一段时间差,从而实现了用精密的时钟脉冲去度量位移。

时间和空间分属截然不同的两个维度,但是“运动”把二者联系在一起。“制造一个内部的匀速运动坐标系”,成了时栅区别于其他位移传感器的关键技术。通过运动把时间和空间联系在一起,摆脱了传统栅式位移传感器对超精密刻划的绝对依赖,回避了由此带来的一系列弊端。虽然目前在制造匀速运动时也需要构建某种精密刻划,但因其精密度呈数量级的降低而具备产品化的显著优势。

经过近 30 年的发展,时栅受到越来越多的关注。

2 技术现状

2.1 产业化替代

时栅已经经历了“思想-技术-产品-产业”全过程,除了项目应用以外,小批量、多品种的产品已经面市多

年,开始加速,目前已有 3 家知名大公司介入时栅的产业化工作,解决大批量生产线、抗干扰、可靠性等产品化过程中的技术问题。这一类问题被认为是与院校科研机构从事科研工作“截然不同”的研究课题,是对科技人员和工程技术人员的另一类考验。

现在,30 多年前人们就意识到的“进口光栅价格昂贵、使用娇气”等问题依然存在,还多了一条“供货不及时”,但已经可以看到通过时栅传感器逐步实现国产替代的曙光了。

2.2 填补技术空白

为解决一些传统位移传感器不能解决的特殊问题,提出并开展了“寄生式时栅”新技术的研究^[1]:时栅不作为一个完整的传感器独立存在并使用,而把被测件的机械等分(电机等分槽、齿轮等分齿、轴承等分钢球等)当作时栅的一部分,即传感器与被测机械融为一体。目的是解决“极端”(特大型、强冲击振动、恶劣环境等,传感器无法正常使用)条件下和“特殊”(中空、限重、狭窄等,传感器无法安装)条件下的位置精密测量与跟踪定位控制问题,已在几项国防重大项目中成功应用。

2.3 超越精度指标

近年来,时栅的精度指标被不断刷新,在中国计量科学研究院分别为电场式圆、直线时栅(又称纳米时栅)出具的最新检定报告中,精度:±0.06″、±96 nm;分辨力:0.01″、1 nm,已达到国际领先水平。

3 发展趋势

3.1 时栅传感器机理发展

时栅传感器的运动坐标系可以用多种方式构成,将其发展历史、现状和可预见的未来归纳如图 2 所示。

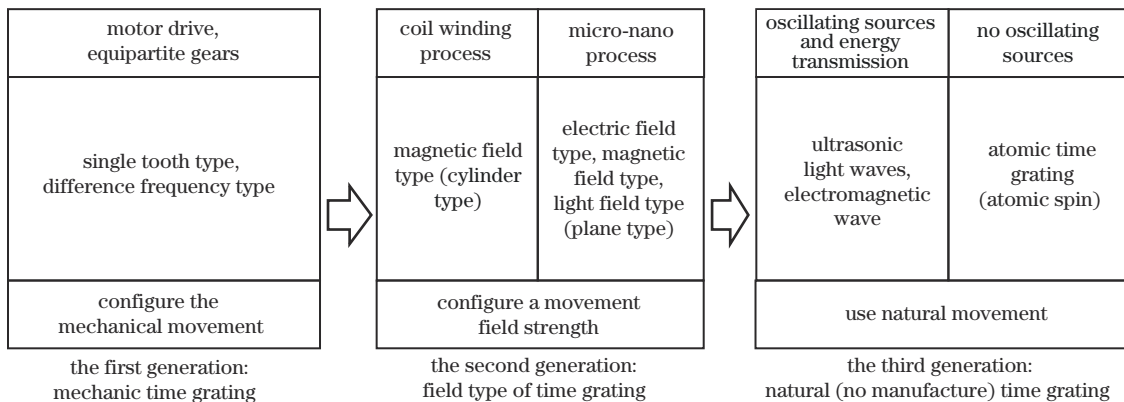


图 2 时栅位移传感器发展的过去、现状与未来

Fig. 2 Past, present and future of time grating displacement sensors

先介绍目前正在经历的第二代场式时栅阶段。正如传统位移传感器的空域刻划可以采用各种物理手段,时栅为了形成运动坐标系而制造空间阵列时也可以采用这些手段。时栅源自完全不同的测量原理和工作机理,而在转换媒介方面逐渐探索,采用了现有传统位移传感器的各种形式,最后获得了显著、不同的实用

效果。

在人为构造运动的场时采用了机、磁、电、光等多种方式手段,这就导致了时栅在结构和工艺上与传统位移传感器十分相似,而区别在于,现在的刻划是为了构造一个匀速运动坐标系 V ,而不是测量基准 Δx ,因此:

1) 时栅的等分刻划与传统传感器的刻划相比,精度要求大大降低,这对加工设备的相关能力是一种极大的解放。

2) 时栅同时对刻划形状的要求显著提高,有等分要求,有形状要求,也有排列布局要求。栅线变成了栅面,刻划变成了“刻画”,对刻线细密的追求变成了对设计刻画形状科学性的追求;且栅线沿一维空间简单排列,变成了栅面沿二维空间正交阵列。

3) 除了沿空间正交的栅面阵列,时栅还增加使用了沿时间正交的电信号序列。

分别使用磁场、电场、光场 3 种媒介作出的第二代 4 种场式时栅传感器局部图,如图 3 所示。

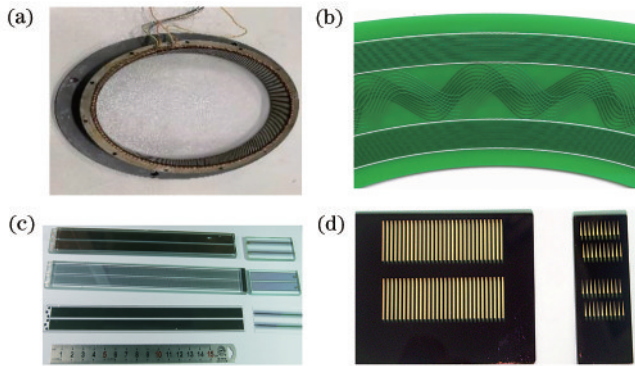


图 3 4 种场式时栅传感器样机结构。(a)柱面绕线磁场式;
(b)平面磁场式;(c)平面电场式;(d)平面光场式

Fig. 3 Prototype structure of the four kinds of field type time grating sensors. (a) Cylindrical winding magnetic field type; (b) plane magnetic field type; (c) plane electric field type; (d) plane light field type

在目前时栅尚未大面积、长时间用于生产科研实践的情况下,尚不能断言这 4 种时栅的优缺点,目前只能以传统位移传感器为对比,参考已得到的实验数据进行预测性分析:

绕线磁场式时栅类似于旋转变压器,抗油污粉尘水汽和冲击振动力强,精度为 $2''\sim 10''$,适用于武器系统等特别恶劣的工作环境;弱点在于机械等分开槽和绕线较难。平面磁场式时栅类似于感应同步器,激励频率较高,抗电磁干扰力较强,适用于机床等较为恶劣的工作环境,精度为 $1''\sim 3''$ 。电场式时栅类似于容栅,是目前精度最高的,达到 $0.06''$,正在冲击世界最高水平 $0.01''$ 并成为国家圆分度计量基准;而其是否像容栅一样忌水,还有待观察,可能更适用于半导体产业等较为洁净的工作环境。光场式时栅类似于粗光栅,对电磁干扰不敏感,抗环境污染力较差,目前技术成熟度尚不如前 3 种时栅^[2]。

再探讨时栅机理扩展的可能趋势。除光、电、磁外,能够被宏观刻划方式精确约束的场都不可行(例如:声场、温度场、引力场)于是转向自然界微观存在的、天然的匀速运动,即发展“第三代时栅”。目前,传

统位移测量技术利用空间自然分度构成测量基准的只有激光干涉仪一种方式,而时栅已开始尝试利用原子自旋,以及在真空、某种介质或一段实体材料中传播的电磁波、光波或超声波来构成所需的匀速运动坐标系,其与第二代时栅的显著区别在于“免刻划”,即完全回避人为的空间几何排列或阵列。

“第三代时栅”是刚开始的研究方向,对其深入认识和科学划分还远远不够,图 2 中第 1 种划分是按有无振荡源、有无能量传播而定,以此将原子自旋方式单列。声、光、电的波动现象发生及波动频率都取决于振荡源(频率固定且可能人为调整),且能够进行大距离能量传输。而原子自旋^[3-5]、电子绕原子核旋转这些物质内部的微观运动是物质的自身特性,不需要外加振荡源;这些运动一般受原子核的约束,不能像波动现象一样自由地进行能量空间传输。正常情况下,这些运动的转速虽然恒定,但其转动的轴线方向却随机无序,因此就需采取某种手段对其进行微观意义上的约束即操控,来实现构建时栅运动坐标系的目的。

第 2 种划分是从宏观意义上根据有无传播介质而定。光波和电磁波即使在真空中也可以传播,而声波则必须依赖传播介质,包括空气和水。

第 3 种划分则是在技术应用层面的,根据有无引导实体(固体)而定。这种引导实体可以做成直线、环状和任意曲线状,从而实现对场的运动轨迹另一种意义上的宏观约束。

3.2 时栅传感器特色发展

作为一种新型传感器,时栅具有一些不断被认知和实现的显著特色:

1) 任意大小尺寸

某军工项目研制的直径 1.8 m 大型时栅传感器(对定子、转子线圈骨架进行等分开槽、安装线圈)如图 4 所示;而目前制作的最小时栅直径仅 32 mm。不难想象,更大的传感器也能制作。

2) 极限参数指标

上述时栅达到的精度和分辨力(无须细分处理)指标,已经远超进口光栅($\pm 1''$)和禁运光栅($\pm 0.4''$)的指标,目前正在不断寻求新的突破,争取成为圆分度计量的国家基准,尤其是冲击圆分度精密测量的世界最高水平($\pm 0.01''$),其中需重点解决“在没有更高精度基准的情况下,如何证明自身精度”这个重大科学问题。

3) 复杂结构形式

上述寄生式时栅除在几项国防项目成功应用以外,还在本团队独立研制精密蜗轮母机的过程中起到十分关键的作用^[1]。该机床设计要求多个位移传感器与机床部件有机融为一体,以真正实现加工测量一体化。因时栅可以做成各种复杂结构,满足了特殊的设计要求。例如,图 5 中机床下面的工作台被加工成两圈齿(从未有任何机床采用此方式),把工作台同时做成了寄生式时栅,可以测出工作台内部安装的角位移

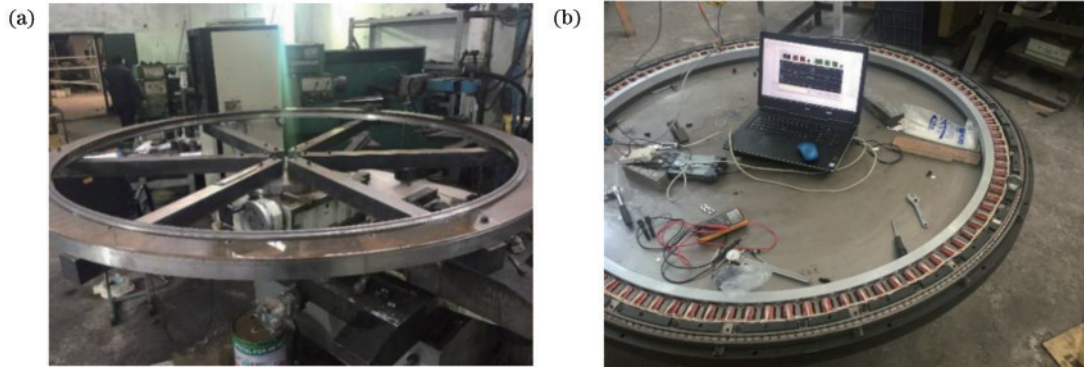


图 4 本团队制作的直径 1.8 m 大型时栅角位移传感器。(a)正在切割的定子线圈骨架;(b)安装完毕的转子线圈骨架
Fig. 4 1.8 m diameter large time grating angular displacement sensor made by our team. (a) Stator coil skeleton which is cutting; (b) rotor coil skeleton after installed

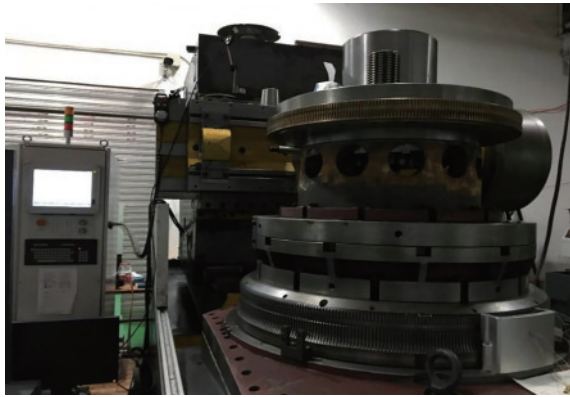


图 5 本团队独立研制的精密蜗轮母机
Fig. 5 Precision worm gear pair mother machine independently developed by our team

传感器所测不出的自身运动累积误差,也就是解决“观察者与被观察者在同一条船上,看不出水面波纹所引起的晃动”问题。

4) 特殊功能要求

在关于磨齿机数控方法的研究工作中,提出一种与传统位移传感器“等间距刻划”完全不同的、自含某种误差信息的“非等间距刻划”时栅位移传感器,进而形成一种全新的实时补偿新方法和系统:通过检测获取的误差信息不再经过数控系统的计算机进行具有反向抵消性质的反馈输出,去修正和补偿加工量,而是交由事先固化了这些误差信息的智能时栅传感器采用前馈控制的方式,在原有数控系统的配合下完成误差补偿工作。

3.3 时栅传感器应用发展

1) 新概念机电功能部件

检测技术与被测系统的集成主要依靠两方面的技术进步:① 传感器越做越小,例如温度、振动、噪声等传感器,已经能够做得非常小而不受影响地嵌入到被测体之中实现其功能;② 发展了许多自身具有感知和转换功能的新型材料,例如光纤传感材料、压电陶瓷等,直接嵌入或粘结在被测体内部使用,进而诞生了许

多智能化产品。但是,作为精密机电系统中非常重要的位置检测,却始终无法实现与被测部件融为一体,这是因为传统位移传感器虽工作原理不同,但都离不开精密的沿空间等分刻划度,也就决定了不能做得非常小,也不能找到具有替代功能的特种材料,因此其实体只能独立于被测物体存在。

上述寄生式时栅技术可引出一系列自带位置检测功能的新概念机电产品。例如与机械驱动相关的带检电机、风机,与机械传动相关的带检齿轮、齿条和与机械运动相关的带检轴承、导轨等新的智能化产品。

2) 多维时栅传感器

不同于二维光栅需要精密制造三维复杂结构体,二维时栅只需通过平面刻划,即可在三维空域内构造特征波动场(磁场或电场),经传感单元阵列拾取不同位置的场强变化并解耦,实现 2 个维度的位移测量。

目前实现的手段有:① 构建平面励磁线圈阵列,在测量平面内建立平面驻波磁场,利用沿二维坐标轴空间正交的传感矩阵感知场强变化,通过幅值比较实现位移测量;② 构建沿二维坐标轴分别排列的一维平面励磁线圈线阵,在测量平面内建立正交双行波磁场,利用传感阵列分别感知各维度场强变化,通过相位比较实现位移测量;③ 构造平面导电阵列,利用磁场激发和感应阵列产生并感知电涡流场变化,通过幅值或相位比较实现位移测量;④ 构建平面电极阵列,在测量平面内建立平面电场阵列,利用不同位置的感应电极感知电场变化,通过幅值或相位比较实现位移测量^[6-9]。

在此基础上,利用特征波动场的三维矢量分布特性,通过在三维空域内特异化布置传感单元感知场强变化,还可实现三维或多自由度位移测量。

3) 机械量复合测试

目前进展较为显著的,是基于时栅技术的新型惯导技术。针对我国轨道检测精度和检测效率的尖锐矛盾问题,研究兼有“低成本、高精度、变结构”显著特色的经济型民用惯性测量新方法,研制一种采用中等精

度光纤陀螺的新型惯导式轨道动态检测车,形成一套“时栅+惯导”的组合姿态测量新技术。提出利用时栅传感技术同时获取载体运动的高精度里程(位移)和速度信息,用于构建误差检测矢量基准对姿态测量累积误差效应进行精密修正,从而在“既不依赖内部高精度惯性组件,也不依赖外部卫星导航信息修正”这两项重要前提下完成高精度的三维姿态测量。本方法“强化高精度里程和速度信息获取,弱化对陀螺和加速度计精度要求,摒弃卫星导航信息修正”,是一种与传统方法显著不同的研究新思路,近期可满足高铁和城市轨道检测的国家重大需求,中远期则可开辟更为广泛的惯性测量技术应用市场^[10]。

4) 计算机数控新技术

上述非等间距时栅,其输出信号不是由固定空间间隔栅线唯一确定的脉冲信号,而是一系列由芯片控制、柔性可变、任意时间间隔的时钟脉冲信号,于是形成一种特殊功能:人为设计这个变化的间距去提前反映某一确定的误差信息。

在实用中,就像不再通过一副透亮保真的眼镜把客观的曲线如实反映到大脑,再经大脑修正成为直线去指挥脚步前进;而是通过一副“变形的眼镜”将客观的曲线“反扭曲”成为直线后直接指挥脚步,原本由大脑完成的工作降阶改由眼镜完成,以此达到 2 个独特效果:

① 大大降低对机床数控系统的指标品质要求,比如可由时栅提供比国外数控系统还多 100 倍以上的插补点。既可彻底摆脱进口数控系统在功能上被人为设置的屏蔽和不开放形成的制约;又可为国产数控系统带来更多的应用和提高机会,有助于国产替代,显著降低机床成本。

② 显著提高磨齿机数控加工过程的刚性效果。因为 2 个智能化时栅角位移传感器直接安装在刀具(砂轮)和转台(工件)上,最大限度逼近加工现场,误差信息的获取、传输、处理和补偿修正均可就地完成,从原理上说,实时性更好,计算机数控带来的滞后效应更趋于零,有助于零件加工精度的显著提高。

3.4 时栅传感器技术发展中的问题

时栅作为一种发展中的全新技术,后续需完善和解决的问题体现在 2 个方面。

1) 基础理论和运行新机理

除前述可能出现的新运行机理外,研究工作重点在于:为时空转换思想建立更科学的数学模型,及其与传统相关理论的联系与区别。尤其是派生出来的寄生式时栅,引申出更深层次的科学问题,有待攻克。

2) 工程化过程的关键技术

利用传统工艺加工的时栅传感器,除精度指标外,还有响应频率、速度波动、互换性、一致性、精度保持性等众多产品化指标和一系列技术问题,有待逐一攻克。

4 时空转换思想的延伸

时栅的提出和发展,是将科学技术研究的思维方式上升到时域、空域及其相互转化层次的一个案例。此外,还曾提出过 3 个延伸的类似观点,在这里讨论。

4.1 电气是时间,机械是空间

电信号传播速度太快,无论幅值、频率和相位均齐涨齐跌,随空间变化而变化的概念很弱,因此在有关电信号处理的理论体系中,大多为时域,即可以认为电信号的变化与空间无关,只与时间有关。常见表达式为

$$E = A \sin(2\pi ft) = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad (1)$$

式中: E 为电压信号; f 为频率; A 为信号幅值;自变量 t 为时间; T 为时间周期。

与此对应,动态的机械信息则总是与空间相关,即可以认为机械信号的变化与时间无关,只与空间有关。典型的例子是旋转机械运动,以一个圆周 $W=360^\circ$ 为空间周期:

$$E = A \sin\left(\frac{2\pi x}{W}\right), \quad (2)$$

式中: x 为自变量空间; W 为空间周期。

即误差信息是随空间位置 x 的变化而周期性地改变。只是由于机械一旦运动起来,同时也就成为时间函数,而人们又习惯于时域的思维方式和成熟的理论体系,因此较少有人采用式(2)反映的“空间域”或空域概念去分析问题。

前期在机床传动误差测量仪器和数据处理方法的研究中,构建了动态检测误差信息的空域表达数学模型,从时域到空域、时间频率到空域频率、时域矢量到空域矢量、时域快速傅里叶变换(FFT)到空域FFT变换等。也就是用空间的概念去建立误差坐标系,尤其是基于空间域的快速傅里叶变换,取得了超乎寻常的准确诊断效果^[1]。既然空域快速傅里叶变换应用效果如此好,如果采用“时空对耦”的思路,把电信号处理中各种成熟的时域分析方法(如拉普拉斯变换、多普勒效应、布里渊频移),全都逐一拿到空域里试一下,会有什么样的新发现?

4.2 程序是时间,电路是空间

在上述机床传动误差测量仪器研究过程中,为使其既有软件程序的柔性,又有硬件电路一触即发的实时性,避免由于计算机响应的时滞带来测量误差的问题,提出了一种用多组相同的电路轮流做同一件事的技术方案,取得非常好的效果。在描述这个方法时画了一幅所谓“预处理循环控制流图”,并指出这幅图既不同于通常的程序框图(属时间序列,工作按时间先后顺序),也不同于通常的电路图(属空间序列,元件按空间分布排列),而是二者的结合,即“按空间嵌套分布的硬件电路循环+按时间嵌套的软件语句循环=被

预处理的控制流实时受控循环”。其中重点是模仿了程序框图在时间意义上的循环和嵌套(根据某条件的满足与否,形成不同的时间意义上的大小循环和嵌套),而设计了电路图的循环排列,执行程序在“各个不同的相同电路”里依次完成,此时用的这一段 A 电路,彼时用的另一段 B 电路,再后又用的 A 电路,形成了空间意义上的循环和嵌套。这张图的循环走向标识,表明了设计者希望某一段程序在某一段时间要在某一段电路里执行的意图,最终达到“用无限的电路空间去换取极其有限的程序时间”的目的^[11]。

4.3 听觉是时间,视觉是空间

声音信息是按时间的先后顺序进入人耳的,应属于时域。普通人听觉的空间概念仅限于左声道、右声道。有“金耳朵”之称的乐队指挥好一些,闭眼也可以分辨不同乐器的空间位置。而视觉则大不一样,睁眼一看,所有物体按空间分布,大小、形状、位置、颜色等瞬时一目了然,纯属空域。按照此观点和前述观点可以引起 2 个讨论:

1) 目前在振动噪声研究领域,采用的传感器如加速度计、声传感器等,分析的都是时域电信号,横坐标都为 t ,要想再有新突破很难。但所谓“百闻不如一见”,如果采用位移传感器,分析空域信号,横坐标为 x ,把听到的机械噪声信息用空域误差信号(比如传动误差信号)图形的方式由眼睛去观察,有可能另辟蹊径,前期研究已经有所体会。

2) 早就意识到且找不到解释:电磁学与数学结合如此严密,如此高深,麦克斯韦方程里的梯度、旋度、散度把看不见摸不着的电磁场解释得如此天衣无缝;前面提到的拉普拉斯变换等针对的都是时域信号、电信号。而与之相比,机械学涉及的数学知识通常用三角函数就足够,最多也就涉及微分几何。但如果因此就说机械学的学问不如电磁学深奥,那就好比说人的眼睛不如耳朵好用(盲人比聋哑人困难得多)。事实上,机械学所包含的学问,是另一种类型的博大精深,需要考虑如何像用数学去看待电磁学一样,从更深层次欣赏属于机械学的那一份优美,敬畏属于它的独特法力。

5 结 论

通过上述讨论,可以推导出结论:电磁学、听觉和时间更为相关,以数学形式体现出来的逻辑思维性更强,更多占用人的左大脑,这是一条主线;而另一条主线:机械学、视觉和空间更为相关,以图形形式体现出来的形象思维性更强,更多占用人的右大脑。

精密测量属于交叉学科,通过建立起上述思维模式,在研究工作中有意识地进行时空转换、机电转换、视听转换等,可能会更有利于调动左右大脑潜能,更有利于交叉性的创新。上面提到,在前期研制机床检测仪器时,采用电路空间换取程序时间的方法,非常有效地解决了信号采样的时间滞后问题;在研究数据分析

算法时,采用了空域快速傅里叶变换,被认为“故障诊断准确率达 100%”^[1];时栅则是采用这种思维模式迄今影响最大、最为成功的一个范例。显然,知道了这个思想延续过程,就不难回答听到过最多的提问:“怎么会产生时栅这种用时间测空间的想法?!”

前述提到了时栅技术的应用前景,时栅传感器机理的发展前景,而关于时空转换的思想研究也希望能有后来者延续下去,发出的许多诱导性提问,就是为了挑起相关的讨论。根据那句老话:“原始创新和一般创新的区别在于:后者是延续一个已有的创新周期,而前者是开创一个新的创新周期”,时栅若真是属于原始创新,那在这个新周期内产生的创新性成果应该远不止上述的这些方面,关注和参与的人应该远不止一个团队。

致谢 本文涉及本团队一众成员的研究成果,尤其是付敏、武亮直接参与了本文的讨论,在此一并感谢!

参 考 文 献

- [1] 彭东林,刘小康.时栅传感技术与超精密蜗轮副[M].北京:科学出版社,2020.
Peng D L, Liu X K. Time grating sensing technology and ultra-precision worm gear pair[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 付敏,陈凡,朱革,等.一种基于旋转光场的高精度角位移测量方法研究[J].光学学报,2021,41(18):1812001.
Fu M, Chen F, Zhu G, et al. High-precision angular displacement measurement based on rotating optical field [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1812001.
- [3] Kominis I K, Kornack T W, Allred J C, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. Nature, 2003, 422(6932): 596-599.
- [4] Allred J C, Lyman R N, Kornack T W, et al. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(13): 130801.
- [5] Budker D. A new spin on magnetometry[J]. Nature, 2003, 422(6932): 574-575.
- [6] Wu L, Tang Q F, Chen X H, et al. A novel two-dimensional sensor with inductive spiral coils[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(13): 4857-4865.
- [7] Wu L, Xu S, Zhong Z Q, et al. An inductive sensor for two-dimensional displacement measurement[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1819.
- [8] 齐晨英,徐常平,白扬博,等.基于非绝热型微光纤的高灵敏度磁场传感器[J].中国激光,2021,48(24):2406003.
Qi C Y, Xu C P, Bai Y B, et al. High-sensitivity magnetic field sensor based on non-adiabatic micro-fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2406003.
- [9] 刘思晨,黄恽,邓传鲁,等.基于磁致折变效应的掺铒光纤磁场传感器温度特性研究[J].中国激光,2022,49(9):0910002.
Liu S C, Huang Y, Deng C L, et al. Temperature

- characteristics of Er-doped fiber magnetic field sensor based on magneto-refractive effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0910002.
- [10] 邹劲松, 冯济琴, 唐皇. 基于积分清零补偿的加速度计信号数字化处理方法[J]. 仪表技术与传感器, 2020(10): 25-28.
Zou J S, Feng J Q, Tang H. Digital processing method of accelerometer signals based on integral zeroing compensation[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020 (10): 25-28.
- [11] 彭东林. CAT 和 CNC 的预处理循环控制流研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1996, 19(2): 95-98.
Peng D L. The research on pretreatment and cycle stream of control for CAT and CNC[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1996, 19(2): 95-98.