DOI: 10.3901/JME.2021.03.174

精密机电产品均匀性装配的定义与关键技术^{*}

巩 浩¹ 刘检华¹ 孙清超² 夏焕雄¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

2. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 当前, 装配环节对精密机电产品装配精度和性能稳定性的保障作用正日益凸显。针对现有的以几何量控制为主的装配理论与方法, 不能保障精密产品的装配精度及其性能稳定性的问题, 提出均匀性装配的概念, 指出均匀性装配是连接结构应力对称均匀分布的各种装配方法、工艺和装备技术的总称, 详细阐述了均匀性装配的内涵体系、主要特征、连接结构类型和关键技术等, 并从面向均匀性装配的精密机电产品设计、面向均匀性装配的工艺规划与设计、面向均匀性装配的测量与检测、面向均匀性装配的工艺装备、面向均匀性装配的辅助装调, 以及面向均匀性装配的补偿策略等六个方面, 详细论述了均匀性装配的主要研究方向。最后, 总结了均匀性装配对精密机电产品装配支撑作用和意义。

关键词: 均匀性装配; 精密机电产品; 装配精度; 性能稳定性; 连接结构; 应力均匀分布

中图分类号: TG156

Definition and Key Technologies of Uniform Assembly for Precision Electromechanical Products

GONG Hao¹ LIU Jianhua¹ SUN Qingchao² XIA Huanxiong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Currently, assembly process plays an increasingly important role in ensuring the assembly accuracy and assembly performance stability of precision electromechanical products. Aiming at the problem that the existing assembly theory and method based on geometric control cannot fully guarantee the assembly accuracy and assembly performance stability of products with high precision in service, the concept of uniform assembly is proposed. Uniform assembly is the general term of all kinds of assembly methods, processes and equipment technologies for the uniform distribution of stress in a connection structure. The connotation system, main features, connection structure types and key technologies of uniform assembly are described in detail. In addition, the main research directions of uniform assembly are discussed in detail from six aspects: the design of electromechanical products oriented to uniform assembly, the process planning and design oriented to uniform assembly, the measurement and detection oriented to uniform assembly, the process equipment oriented to uniform assembly, the auxiliary assembly and adjustment oriented to uniform assembly, and the compensation strategy oriented to uniform assembly. Finally, the significance and function of uniform assembly to the assembly technology of electromechanical products is summarized.

Key words: uniform assembly; precision electromechanical products; assembly accuracy; performance stability; connection structure; uniform stress distribution

0 前言

装配是将加工完成的零件按照规定的技术要求

组装起来, 并经过调试、检验等成为合格产品的过程^[1]。装配作为机电产品生产工作的后端, 具有手工劳动量大、耗时长、费用高等特点。据统计, 在现代制造中装配工作量占整个产品研制工作量的 20%~70%, 平均为 45%, 装配时间占整个制造时间的 40%~60%。装配质量直接影响机电产品性能

^{*} 国家自然科学基金(51935003; 51675050)、北京市自然科学基金(3204054)和“十三五”国防基础科研(JCKY2016204B201)资助项目。20200210 收到初稿, 20201113 收到修改稿

和服役可靠性,根据近几年航天器故障归零情况统计表明^[2],约90%是制造问题引发的,其中装配环节问题又占了制造问题的60%以上。

精密机电产品是制造精度达到某一量级的一类机电产品,高精度和高稳定是精密机电产品装配的典型特征^[1],以高精度惯性仪表为例,其关键组件的装配精度要求控制在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$,机械装配体的质心漂移要求控制在 $0.5\ \text{nm}$ 以内,同时要求在服役期间性能保持稳定。相关研究和工程经验表明,精密机电产品在装配过程中形成的装配应力,在其贮存与服役环境下的非均匀变化或释放,导致零件形状和位姿发生微小变化,是影响其系统精度和性能稳定性的主要原因之一。针对精密机电产品装配中的装配应力控制问题,有学者提出了无应力装配或者微应力装配的概念^[3],拟尽可能地在装配过程中降低装配应力,从而达到提高装配精度以及装配性能稳定性的目的。以某光学成像敏感器反射镜组件的精密装配过程为例^[4],通过微应力装配,平面度公差从 $0.008\ \text{mm}$ 提高到 $0.002\ \text{mm}$,经过反射镜力学和热学环境实验,反射镜指向变化由 $\leq 2'$,提高到 $\leq 1'$,其性能稳定性显著增强。但是,工程中无应力装配或微应力装配的操作难度极大,而且对于大多数精密机电产品,适度的预紧力或装配应力也是保障装配性能的必要条件。

两个连接的零件表面、近表面实体及其中间间隙或填充介质组成的结构,称为装配连接结构。精密机电产品完成装配以后,零件加工后的残余应力、装配过程中产生的应力以及服役过程中产生的应力是装配连接结构的主要应力来源,由于零件配合误差、材料蠕变和不合理的装配工艺等因素,导致连接结构应力很可能处于非均匀分布状态,进而在应力再分布的过程中改变零件之间的相对位置关系。陈建峰^[5]指出非均匀应力场是影响惯性仪表精度和性能的主要因素。此外,众多的研究结果表明,应力非均匀分布也是影响精密机电产品装配精度和服役状态下性能稳定性的关键因素,例如,王先根等^[6]在研究加工中心的精密装配时发现,连接结构应力分布特性显著影响其系统精度保持性;李明等^[7]在研究航空发动机转子系统的精密装配时发现,结合面刚度的不均匀显著影响整机振动,并诱发振动故障。张之敬等^[8-10]利用信息熵理论对接触应力分布的均匀程度进行了定量评价,并描述了应力均匀分布和性能稳定性之间的关系,指出应力分布越均匀,熵值越大,此时整个精密装配系统处于更加稳定的平衡状态,抵抗外部环境(温度交变、振动、

冲击等)引发变形的能力越强,从而显著提高精密机电产品的性能稳定性。因此,应力分布的均匀程度成为精密机电产品装配精度和性能稳定性的重要指标,应力均匀分布也成为精密机电产品装配所追求的目标之一。

当前,国内外学者对连接结构应力非均匀分布和装配精度及性能稳定性之间的关系进行了一些探索性研究,但是工程中仍然以无应力装配或微应力装配的提法为主,均匀性装配的相关概念和内涵还未统一,也缺乏相关技术体系研究。为此,本文提出均匀性装配的概念,详细阐述其内涵体系、主要特征、配合类型、关键技术和主要研究方向,并论述其对精密机电产品装配的支撑作用与意义,拟通过发展均匀性装配技术,直接保障精密机电产品的装配精度和性能稳定性,并推动精密装配理论与技术的发展。

1 均匀性装配的内涵

传统的以几何量控制为主的精密装配理论与方法^[11],通常基于最小包容区域的原则将零件表面的几何形状误差看作附加的尺寸误差,利用尺寸链的公差计算保障装配精度。忽略了装配以后连接结构的应力分布对装配精度和性能稳定性的影响,这些应力来源包括零件的加工残余应力、装配过程中产生的应力以及服役过程中产生的应力。均匀性装配主要针对一些具有对称结构的装配连接结构,这里的均匀性并不是应力大小完全相同,而是强调应力在对称方向上的分布保持一致。均匀性装配是对传统精密装配理论与方法的拓展和延伸,既提高精密机电产品的装配精度和初始性能,又保障服役状态下的性能稳定性,这里的性能是机电产品装配后具有的所有性质和功能的统称,包括几何装配性能(例如装配精度,包括相互位置精度、相对运动精度和相互配合精度,以及装配精度保持性等)和物理装配性能(例如发动机转子的振动特性、服役寿命等)。相较于传统的无应力/微应力装配,均匀性装配具有更强的普适性和工程应用价值。通过综合相关文献,给出如下定义,均匀性装配是指精密机电产品装配过程中,连接结构应力对称均匀分布的各种装配方法、工艺和装备技术的总称。

从这个定义出发,均匀性装配的内涵主要表现在以下几个方面。

(1) 从几何精度控制拓展为应力均匀控制。传统的精密装配理论仅仅将形状误差看作附加的尺寸

误差,通过几何精度控制保障装配精度。均匀性装配在几何精度控制的基础上,考虑连接结构的配合形式,通过连接结构应力对称均匀控制保障装配精度和装配后性能稳定。这里的应力控制既包括装配过程中应力对称均匀控制,也包括服役过程中对外部环境引发的非对称均匀应力的调控。

(2) 以装配界面形貌误差为主导。由于不同加工工艺和材料特性的影响,零件表面通常是一系列波峰、波谷组成的误差表面,其大小和分布直接影响连接结构应力分布和装配精度^[12]。根据不同的观测尺度,形貌误差分为形状误差、波纹度和粗糙度,其中波纹度和粗糙度通常是微米/亚微米级,需要根据装配精度要求选择不同尺度的表面形貌误差。

(3) 以连接结构的弹塑性变形为基础。精密机电产品在装配过程中,受紧固力、重力、过盈配合、填充介质凝固收缩等作用,连接结构发生弹塑性变形,产生连接结构应力,因此,连接结构的弹塑性变形是计算应力大小与分布的基础。

(4) 以面向连接结构应力对称均匀分布的工艺优化为重要手段。装配工艺是指导均匀性装配的主要技术文件,由于表面形貌误差和连接结构配合方式的不同,不同的装配工艺可能导致应力分布的差异,均匀性装配的关键过程是以连接结构应力对称均匀分布为目标,对装配工艺方法、装配顺序、装配路径、装配工艺参数等进行优化,这是实现均匀性装配的重要手段。

(5) 以均匀度与对称度为均匀性的量化指标。均匀度与对称度的度量属于统计学的范畴,可根据具体的连接结构的几何特征选用不同的统计方法。目前在装配领域针对连接界面应力分布,提出了一种采用信息熵的新颖度量方法,该方法是一种系统复杂程度的一种度量方式,将连接结构应力进行离散化,获得应力分布的概率统计,利用信息熵对离散的应力空间特征的均匀程度进行定量评估^[8-10],应力分布越均匀,熵值越大,表明装配系统越稳定,反之熵值越小,装配系统越容易产生波动。

(6) 以应力应变精确测量为保障。精确地测量连接结构应力是准确获得应力分布规律的直接保障,也是后续实施均匀性装配的技术保障,精密机电产品装配的连接结构微观变形量通常很小,需要高精度测量设备或系统才能保障连接结构应力应变的精确测量。

(7) 以连接结构应力对称均匀分布为目标。均匀性装配直接作用于不同的连接结构,目标是在精密装配的过程中通过各种工艺、方法、装备等控制

连接结构应力分布的对称均匀性。

(8) 以保障装配精度和性能稳定性为目的。均匀性装配提出的目的,是通过控制连接结构应力对称均匀分布,降低连接结构的相对位置关系的潜在变化,使得装配系统处于更加稳定的平衡状态,从而保障初始装配精度和贮存与服役过程中性能的稳定,提高精密机电产品的服役可靠性。

图 1 均匀性装配的概念和内涵体系

均匀性装配中的均匀性指标的量化表达是实施均匀性调控的关键理论环节,正如前文所述,针对均匀性装配中的均匀度与对称度的度量方法属于统计学范畴,可以有多种不同方式,这里给出一种形式化的度量方式如下

$$\Phi = \Phi_{\mu}(D[\sigma]) + \Phi_s \left(\int \sigma x dA \right) \quad (1)$$

式中,均匀性指标 Φ 由均匀度指标 Φ_{μ} 与对称度 Φ_s 指标构成,其中均匀度指标与连接界面应力分布的方差有关,对称度指标与连接界面应力分布的一阶矩有关。

2 均匀性装配的主要特征

根据均匀性装配的内涵体系,提炼了均匀性装配的多种特征,主要包括精密性、对称均匀性、连接多样性、多学科性、多尺度性和系统性。

(1) 精密性:均匀性装配技术主要面向精密机电产品,具有精密性的特征,这里的“精密”是一个相对的、且随技术不断发展的概念,目前,一般指装配精度达到 $10 \mu\text{m}$ 以内的机电产品装配^[1]。

(2) 对称均匀性:均匀性装配的目标是实现装

配过程中连接结构应力分布的对称均匀性, 因此具有对称均匀性的特征。

(3) 连接多样性: 精密机电产品广泛涉及三种不同类型的连接结构, 如图 3 所示, 即配合面连接、异种材料连接和微间隙连接, 具有连接多样性特征。

(4) 多学科性: 均匀性装配在研究应力产生机理和求解应力分布规律时涉及材料科学、连续介质力学、接触力学等相关理论, 在建模仿真时涉及计算图形学、计算力学、数值计算方法等, 在装配工艺优化时涉及最优化原理, 因此均匀性装配涉及多个学科交叉融合, 具有多学科性。

(5) 多尺度性: 均匀性装配不仅涉及精密机电产品的宏观特性, 如几何尺寸, 同时还涉及结合面微观形貌特征, 微观形貌包括形状误差、波纹度和粗糙度等。此外, 均匀性装配还涉及不同尺度下的应力分布, 例如, 单螺栓端面的应力分布, 法兰盘连接结合面的应力分布, 以及整个产品结构的连接应力分布, 讨论均匀性装配需要确定哪一个尺度下的应力分布, 从这个角度来看, 均匀性装配具有明显的多尺度性特征。

(6) 系统性: 均匀性装配的本质是以连接结构应力的一致性分布作为优化目标, 对装配工艺(装配路径、顺序、参数等)、几何尺寸、形状、公差、粗糙度等进行系统优化, 实现多个连接结构应力分布的协同控制, 因此具有显著的系统性。

图 2 均匀性装配的六维特征

3 均匀性装配的连接结构类型

如前所述, 我们将两个连接的零件表面、近表面实体及其中间间隙或填充介质组成的结构, 称为装配连接结构。根据两个零件表面之间的相对位置关系, 将连接结构分为三种类型, 即配合面连接、异种材料填充连接和微间隙连接, 如图 3 所示。

图 3 均匀性装配的结合面配合类型

(1) 配合面连接: 是最常见的一种连接结构形式, 在装配的过程中两个零件表面直接接触, 零件表面的材料特性和微观形貌, 是影响装配后的微观接触变形和连接结构应力分布的主要因素。实现该种配合形式的均匀性装配, 需要基于零件材料的本构关系和表面形貌的准确表征, 对装配工艺进行优化, 保障装配后的连接结构应力对称均匀分布。

(2) 异种材料填充连接: 是指零件表面之间通过填充一些其他物质材料进行配合连接, 胶粘剂是一种常见的异种材料, 异种材料的本构关系及其与零件表面的键合行为是影响装配后的连接结构应力分布的主要因素, 该种配合形式的均匀性装配需要充分考虑异种材料特性以及与被连接零件的界面行为, 探究异种材料和零件表面的键合行为、连接结构应力产生机制以及异种材料的应力松弛规律, 通过装配工艺优化, 调整涂覆厚度分布、固化时间、固化温度等工艺参数以及处理零件表面理化特性等, 实现连接结构应力分布的均匀性。

(3) 微间隙连接: 是指结合面之间受流、磁、电等物理作用, 通过微小的间隙进行配合连接, 间隙的均匀分布程度决定了连接结构应力的均匀性, 需要建立多物理场耦合模型, 探究在多场耦合作用下微间隙的分布规律, 通过装配工艺优化, 调整配合间隙的大小和分布, 实现连接结构应力分布的均匀性。

4 均匀性装配的关键技术

无论何种连接结构类型, 均匀性装配必须解决的关键难题是: 如何对精密机电产品结合面的微观形貌进行准确表征, 如何求解得到连接结构应力大小及分布, 以及如何进行装配工艺优化实现连接结构应力对称均匀分布。相应地, 均匀性装配的关键技术主要包括表面微观形貌表征、装配应力应变求解以及装配工艺优化方法等, 如图 4 所示。

图 4 均匀性装配的关键技术体系框架

4.1 表面微观形貌表征

现有的国际和国家标准规定^[13]，形状误差是指被测提取要素相对其拟合要素的变动量。采用最小包容区域的宽度或直径来表征，在建模和仿真时通常将形状误差看作附加的尺寸误差，这种表征方式可以满足一般机电产品的装配要求，但对于精密机电产品均匀性装配则需要考虑表面微观形貌特征。接触界面的形貌误差在微观尺度下观察都是凹凸不平的波峰波谷，准确的表面微观形貌表征与建模是均匀性装配中连接结构应力应变求解的基础。

首先，表面微观形貌通常具有显著的多尺度特征，根据尺度的大小可以分为粗糙度、波纹度和形状误差。基于均匀性装配的精度要求选择不同尺度的表面形貌误差表征，通常装配精度要求越高，选择的尺度越小，例如对于三浮陀螺仪这种高精度结构的均匀性装配，需要考虑粗糙度级别的表面微观形貌表征。其次，表面微观形貌表征方法分为实验测量法和理论建模法^[14]，实验测量法是通过形貌测量仪提取表面数据点，利用插值理论建立表面的三维形貌，这是最接近实际的表面微观形貌表征方法。然而，受限于仪器的测量精度和制造成本，还形成了采用统计学参量近似模拟表面三维形貌的替代方法，这些基本参量包括幅度参量、空间参量、混合参量和功能参量等。此外，基于分形理论的三维形貌表征也是常用的理论建模方法^[15]，表面形貌采用分形维数 D 和尺度系数 G 两个参数共同表征，例如 W-M 分形函数^[16]，已经被广泛用于表征表面形貌的

微观轮廓。选择何种误差表面表征方法需要充分考虑均匀性装配精度、仪器的测量精度、材料特性、加工工艺、装配应力求解方法等因素的综合影响。

4.2 装配应力应变求解

如何求解在装配力和物理场作用下连接结构应变，并基于应变计算应力分布是均匀性装配的关键。如果简单地将形状误差看作附加的尺寸误差，基于几何实体的弹塑性变形，通过有限元网格划分和建模仿真就可以实现装配应力应变的求解。如果考虑表面微观形貌误差，应力应变的求解方法主要分为三类：解析法、数值法和实验测量法。

解析法是将表面微观形貌进行简化和假设，获得装配应力应变的解析解，但是这些假设和简化可能造成较大的求解计算误差。例如，微凸体模型^[17-18]将粗糙表面简化为由高度随机或指数分布的球形或其它形状的微凸体构成的表面，利用 HERZT 接触理论表征微凸体的弹性接触过程，求解其受到平面挤压变形形成的应力应变大小；PERSSON 理论^[19-20]将两个平面挤压时的结合面接触应力概率密度函数假设成狄拉克函数，建立粗糙表面高度分布的统计学参数与界面应力分布之间的关系。数值法是直接对实际的三维形貌进行接触求解，包括有限元模型法^[21]、边界元模型法^[22]、半解析模型法^[23]等。有限元模型法直接建立实测的粗糙表面形貌的三维模型，得到装配应力应变，但在接触计算的过程中引入了接触刚度和穿透量的概念，这些虚拟的物理量导致其准确性还需要验证；边界元模型法只需要对粗糙表面进行面网格划分，不需要实体网格划分和表面插值技术对表面进行处理，能够高效地求解粗糙表面的接触应力，但是无法解决弹塑性接触问题；半解析法是先基于固体力学理论求解塑性接触形变，再利用边界元算法求解表面形貌的弹性接触，其难点是塑性应变导致的表面永久变形和内部残余应力场的求解。实验测量法^[24]是直接通过测量设备对实际装配过程中形成的应力应变进行检测。根据测量原理的不同这些方法大致可以分为光学测量法、超声测量法、热/电阻测量法、核磁共振法、X 射线法等，目前这些方法仅仅在实验条件下获得了一定的成功，针对实际的装配系统和现场装配环境相应测量方法还需进一步研究。目前，针对由装配力引起的装配应力应变的求解，已经发展了一些适用的方法，但针对由物理场作用引起的装配应力应变的求解还较为困难，需要基于多场耦合的相关理论与方法进行求解，这是当前装配应力应变求解有待攻克的难题。

4.3 装配工艺优化方法

均匀性装配是在精密装配的过程中实现连接结构应力对称均匀分布的装配技术, 其重要的实施路径是以连接结构应力对称均匀分布为目标, 对装配工艺, 即装配顺序、装配路径和装配工艺参数等进行优化, 由于该优化问题具有强非线性特点, 很难通过经典的优化算法求解, 而智能优化算法为在有限的时间里求解满足均匀性装配精度要求的最优解提供了可能。智能优化算法^[25]是一种启发式优化算法, 适用于解决复杂优化问题, 通常具有优化性能高效、避免复杂求导等优点。在装配工艺优化中常用的智能优化算法主要分为局部搜索法和指导性搜索法两类。其中, 局部搜索法以局部优化策略在当前解的邻域中贪婪搜索, 容易陷入局部最优, 例如模拟退火算法、禁忌搜索算法、爬山算法等; 指导性搜索法利用一些规则来指导整个解空间中优良解的探索, 例如遗传算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法、免疫算法、人工蜂群算法、人工鱼群算法等。在均匀性装配的应用过程中需要针对具体问题, 结合装配精度要求、装配过程及参数的复杂程度等因素, 设计或选择合适的智能优化算法, 实现在少量的计算时间里得到最优解。

5 均匀性装配的主要研究方向

以精密陀螺仪表与光学导引头的装配为例, 系统的精度和稳定性很大程度上受到装配连接结构的非均匀应力场的影响, 其中, 非均匀应力导致的非均匀变形往往严重影响装配后的系统精度, 非均匀应力的重分布往往导致系统精度漂移。非均匀应力场的形成和设计的几何、位置以及表面精度、实际的装配工艺参数、装配误差等因素密切相关, 装备的测量误差显著影响应力分布的准确提取, 此外, 为调控非均匀应力场往往采用辅助装调和装配补偿策略手段。因此, 均匀性装配的主要研究方向包括面向均匀性装配的精密机电产品设计、面向均匀性装配的工艺规划与设计、面向均匀性装配的测量与检测、面向均匀性装配的工艺装备、面向均匀性装配的辅助装调、以及面向均匀性装配的补偿策略六部分内容, 其目的是在设计、装配和服役阶段, 设计合理的装配连接结构及工艺, 并结合先进的检测技术与装备, 实现精密机电产品的均匀性装配, 保障其初始装配精度及服役过程中的性能稳定性。均匀性装配的主要研究方向体系框架如图 5 所示。

图 5 均匀性装配的主要研究方向体系框架

5.1 面向均匀性装配的精密机电产品设计

现有的面向装配的设计, 又称可装配性设计^[26], 是在充分考虑机电产品装配约束的条件下, 保证零件装配的可操作性, 而对机电产品装配性能稳定性的保障作用有限。随着机电产品朝着高精度、高可

靠性方向发展, 如何在设计阶段就充分考虑精密机电产品装配性能的稳定性, 对保障精密机电产品高质量高可靠运行具有重要意义。面向均匀性装配的精密机电产品设计是在可装配性设计的基础上, 对精密机电产品中存在的不利于均匀性装配的问题进

行分析评价,提出精密机电产品结构改进或再设计的建议,从而提高装配性能稳定性。最近已经有学者对均匀性装配的机电产品设计做了初步探索,如西安交通大学的侯亦非等^[27]以螺栓连接装配作为研究对象,针对结合面接触压力分布以及有效接触面积,对结合面形状进行了主动设计,以改善螺栓连接结构的连接性能;LIN 等^[28]提出了一种接触界面材料刚度的优化设计算法,提高了接触压力分布的均匀性。

面向均匀性装配的精密机电产品设计是传统可装配性设计的拓展,是在保证产品易装配的前提下,以连接结构应力对称均匀分布作为装配精度和性能稳定性的评价准则,通过产品结构改进最大限度地提高装配精度和性能稳定性。精密机电产品设计包括几何形状设计、结合面形状设计、结构尺寸设计、尺寸误差设计、形状误差设计、表面粗糙度设计、表面理化性能设计、装配连接方式设计等。为了实现面向均匀性装配的精密机电产品设计,需要突破机电产品几何量、误差量、粗糙度及连接界面特性量等与应力应变分布的映射关系,形成定性或定量评价结构设计的准则,基于这些准则指导均匀性装配的精密机电产品设计。上述研究工作可以利用计算机图形学、材料科学、连续介质力学、接触力学等理论建立机电产品的物理模型和虚拟装配环境,通过大量的虚拟装配仿真实现。此外,完整的精密机电产品装配过程通常涉及多个装配连接结构,因此均匀性装配的精密机电产品设计还需要充分考虑不同装配路径和装配顺序对不同连接结构应力分布状态的影响。

5.2 面向均匀性装配的工艺规划与设计

传统的装配工艺规划与设计^[29]常常以保障产品的可装配性以及几何精度为目标,通过装配偏差传递与累积的尺寸链计算保证装配精度,然而实际的装配过程中,装配力以及物理作用引起的结合面以及几何实体的弹塑性变形也可能对装配精度和装配性能稳定性产生影响。面向均匀性装配的工艺规划与设计是从整个装配工艺过程出发,以装配精度和应力对称均匀分布作为目标,通过智能优化算法对装配工艺进行定量控制。具体包括两个层面的优化控制,首先是装配顺序和装配路径规划,充分考虑装配的操作环境、操作难度、工夹具数量和类型、线缆和管路装配等因素,通过专家系统或启发式算法获得产品的装配顺序和路径,保障零件装配的可行性和便捷性;其次是基于规划的装配顺序和路径,考虑装配的几何精度、材料特性、物理特性等,以

保障连接结构应力对称均匀分布为目标,开发智能优化算法实现对装配工艺参数的定量控制。

面向均匀性装配的工艺规划与设计是对传统装配工艺设计的进一步量化和拓展,需要研究并建立装配工艺参数与连接结构应力分布之间的量化联系,确定影响均匀性装配的关键装配环节和工艺参数,并采用智能优化算法获得最优的工艺参数。此外,对于一些复杂工况下的高精密机电产品,面向均匀性装配的工艺规划与设计还需要从多学科、系统集成和动态视角,利用大数据分析和机器学习理论,建立系统的“新式代理模型”,并通过不断地学习提升代理模型对实际系统的拟合精度,然后结合智能优化算法,探索在多物理场作用下的装配工艺参数优化。最终,突破传统的以几何量控制为主的装配工艺设计的局限,直接保障装配精度及其性能稳定性,为实现可控、可测、可视的精密机电产品装配奠定基础。

5.3 面向均匀性装配的测量与检测

测量与检测技术是保障均匀性装配的直接有效手段,面向均匀性装配的测量与检测内容主要分为以下三类:① 产品几何量和误差量的测量;② 结合面微观形貌的测量;③ 连接结构应力应变的测量。尽管当前针对上述三类测量内容已经形成了多种测量技术和检测设备,有的甚至已经应用于工程实际,但面向均匀性装配的测量与检测仍需要融合信息技术、控制技术、大数据分析技术等,并在以下两方面做进一步探索。

(1) 新型应力应变测量与检测的原理与技术。均匀性装配的核心是保证连接结构应力的对称均匀分布,当前,光学测量法、超声测量法、热/电阻测量法等技术在某些领域已经能够实现应力应变的测量,但随着机电产品精密化、结构复杂化,现有的测量与检测技术受到了一定的限制,仍然需要探索一些新型的测量原理,开发新型的测量技术与设备,实现复杂精密机电产品应力应变的精确检测。此外,均匀性装配通常涉及多个连接结构,如何实现均匀性装配过程中多个结合面应力应变的同时测量也是在研发新型测量技术时需要考虑的内容。

(2) 均匀性装配的智能检测技术。智能化已经成为未来发展的趋势,现有的测量技术仍然停留在半自动化或自动化阶段,未来仍然需要应用一些准确、高效的智能算法,开发智能化检测设备与检测系统,实现对均匀性装配过程中各种特征及参数的智能识别与检测。其次,在检测系统或检测装备中融合控制技术,依据检测结果反馈指导均匀性装配,

形成装配过程的闭环控制。最后,结合大数据分析技术,对检测数据进行二次利用,开发其“剩余价值”,形成指导精密机电产品均匀性装配的工艺知识。

5.4 面向均匀性装配的工艺装备

工艺装备是实现均匀性装配的重要保障工具,同传统的装配工艺装备相比,面向均匀性装配的工艺装备需要融合精确的应力应变测量系统,在精密机电产品装配的过程中通过连接结构应力应变的精确测量保证均匀性装配。

面向均匀性装配的工艺装备的主要研究内容包括以下几个方面。

(1) 当前的机电产品越来越朝着极限化方向发展,例如产品微纳化、大型化、结构复杂化、高精密化等,这对均匀性装配的工艺装备提出了更高的要求,需要开发一些融合新原理、新技术的装配工艺装备,实现在极限条件下的均匀性装配。

(2) 精密机电产品装配过程中各种连接方式(螺纹连接、胶接、铆接等)是产生连接结构装配应力的主要来源^[30-31],因此均匀性装配需要研究各种连接技术与装备,例如研究连接结构应力一致性分布的拧紧参数精确控制技术、双轴/多轴同步控制技术,研究胶粘剂连接的一致性涂覆与固化控制技术和设备等。

(3) 在智能化趋势的引领下,均匀性装配的工艺装备在未来需要融合智能传感技术、实时数据采集/传输技术、多驱动的协同控制技术、误差补偿技术等,在装配过程中通过检测数据的分析和学习,实现对装配工艺过程的智能调整,对不满足均匀性装配的过程参数进行补偿,使得工艺装备具有智能感知、主动分析、自主决策的人工智能行为。

(4) 开发柔性化、集成化的均匀性装配工艺装备系统,柔性化体现在装配工艺装备可移动、可重组、可重用,能够满足不同个性化产品的均匀性装配;集成化体现在装配工艺装备需要集成多种控制与测量技术,实现装配工艺过程的集成控制。

5.5 面向均匀性装配的辅助装调

现有的计算机辅助装调技术^[32-33]主要针对在装配过程中可在线检测系统输出精度的精密仪器仪表的装配,通过在线检测技术和数据分析计算,获取装调参数。相比传统计算机辅助装调技术,面向均匀性装配的辅助装调技术是通过检测中间量来实现辅助装调,它也是面向精密机电产品,需要实时监测装配过程中连接结构应力应变,并将其可视化地展示,建立装调参数和应力应变分布的直观定量的

联系,通过应力应变的可视化分析获取装调参数,实现均匀性装配。因此,面向均匀性装配的辅助装调需要攻克的技术问题是:如何实现连接结构应力应变的实时监测和可视化展示;如何建立装调参数和应力应变分布的映射关系。未来面向均匀性装配的辅助装调仍然需要结合先进的数据分析技术与深度学习方法,实现对装调参数的智能调整,以便快速高效地实现精密机电产品的均匀性装调。

5.6 面向均匀性装配的补偿策略

精密机电产品在服役过程中,由于受到复杂恶劣的服役环境的影响,连接结构应力应变分布很容易发生变化,引发非均匀性装配,进而影响产品性能和服役可靠性。因此,需要在精密机电产品的非工作阶段对其进行装配性能检测,并根据检测结果提出补偿策略,使其再次满足均匀性装配,保障产品性能和服役可靠性能。其中的关键技术是如何制定补偿策略,这里的补偿策略既可以是零件位姿的调整,也可以是螺纹连接件的重新拧紧等。因此,需要利用计算机仿真技术,构建表征精密机电产品及其服役环境的物理模型和虚拟环境,模拟精密机电产品实际的服役过程,研究在服役过程中哪些物理参量的作用引发非均匀性装配,或者直接利用一些检测传感技术,识别关键的状态参数,确定均匀性装配补偿的关键工艺及其定量参数,最后利用闭环控制策略,形成对非均匀性装配的自主调控。

6 均匀性装配的意义与作用

当前,随着制造产品朝着复杂化、精密化、机电一体化等方向发展,以及服役环境恶劣化和极限化,装配环节对精密机电产品装配精度及性能稳定性的保障作用正日益凸显,本文提出的均匀性装配理论与方法具有以下作用。

(1) 保障精密机电产品的装配精度和性能稳定性。传统的装配理论与方法主要考虑产品的可装配性,并以几何量控制为主,装配工艺参数和产品装配性能稳定性之间的科学联系尚不清楚,导致现有的单纯提高精度等级的方式不能完全保障精密机电产品的装配精度和性能稳定性。大量的研究结果和工程实践表明,非均匀性装配是影响装配精度和性能稳定性的重要原因,基于此,本文将连接结构应力对称均匀分布作为调节装配工艺参数和装配精度及性能稳定性的中间变量,提出均匀性装配理论,通过连接结构应力的对称均匀分布保障精密机电产品的装配精度和性能稳定性。

(2) 加快推进智能化装配。智能化装配是未来机电产品装配技术的战略高地,也是机电产品装配技术朝着更高阶段发展的必然结果,智能化装配需要融合信息技术、传感技术、人工智能和自动控制技术等,是多学科交叉的产物。尽管许多学者已经提出了未来智能装配^[34]的发展方向和实现方式,但是目前仍然没有实现智能装配的成熟落地,其难点之一是部分装配性能及其稳定性能存在量化、测量和预测的困难。均匀性装配以连接结构应力的对称均匀分布作为装配性能稳定性的直接表征,提供了一种实现装配性能数据的智能感知、实时监测与分析的有效途径,并基于机器学习理论和自动控制技术,实现机电产品装配过程的智能化。

(3) 推动精密装配理论与技术的发展。提高精度是机械制造学科永恒的追求目标之一,精密装配技术是复杂机电产品装配技术的重要发展方向。当前的精密装配技术主要通过几何量的控制保障装配精度,提高装配性能,但是对服役过程中装配性能稳定性的考虑明显不足。本文提出的均匀性装配理论与方法以连接结构应力对称均匀分布为目标,探索零件的几何量、误差量、连接界面特征量及工艺参数等对连接结构应力分布的影响规律和定量分析方法,有利于实现精密机电产品的性能预测和装配性能控制。因此,均匀性装配的提出能够为解决精密机电产品的装配精度与性能稳定性问题提供理论与技术支撑,从而推动精密装配技术的发展。

7 结论

长期以来,机械加工与装配技术的发展并不平衡,精密、超精密加工等技术的发展使得零部件设计与加工精度的一致性得到显著提高,精密机电产品性能的保障逐渐向装配环节转移。然而,以可装配性和几何量控制为主的装配理论与方法,无法保障精密装配的精度及其性能在恶劣服役环境下的稳定性,严重影响了精密机电产品可靠性。当前,大量的研究结果和工程实践已经表明精密机电产品的非均匀性装配显著影响装配精度和性能稳定性,本文提出了均匀性装配的概念,指出均匀性装配是通过提高装配过程中连接结构应力的对称均匀分布,达到保障精密机电产品装配精度和性能稳定性的目的,并从设计、装配和服役环节阐述了均匀性装配的主要研究方向。本文提出的均匀性装配理论与方法,一方面将有利保障精密机电产品的装配精度和性能稳定性,另一方面将推动机电产品的精密装配

技术及其智能化的发展。

参 考 文 献

- [1] 刘检华,孙清超,程晖,等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 2-27.
LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-27.
- [2] 张婷玉. 精密机械系统装配精度预测与控制方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHANG Tingyu. Assembly accuracy prediction and control for precision mechanical system[D]. Beijing, Beijing University of Technology, 2016.
- [3] 李东升,翟雨农,李小强. 飞机复合材料结构少无应力装配方法研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2017(9): 30-34.
LI Dongsheng, ZHAI Yunong, LI Xiaoqiang. Method research and application progress of less structure and free assembly stress for aircraft composite structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(9): 30-34.
- [4] 张慧锋,龚德铸,张佳星. 交会对接光学成像敏感器反射镜组件微应力装配技术[J]. 空间控制技术与应用, 2018, 45(6): 60-64, 72.
ZHANG Huifeng, GONG Dezhu, ZHANG Jiaying. Micro-stress assembling technique for a metal reflector module of camera-type rendezvous and docking sensor[J]. Aerospace Control and Application, 2018, 45(6): 60-64, 72.
- [5] 陈建峰. 制造特性对液浮陀螺仪组件应力状态影响研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
CHEN Jianfeng. The study of effect of manufacturing characteristics on the stress state of the components in LFG[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [6] 王先根,张建润. 龙门加工中心地脚螺栓组分步预紧工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(6): 839-847.
WANG Xiangen, ZHANG Jianrun. Research on step pre-loading technology of anchor bolts groups in gantry machining center installation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(6): 839-847.
- [7] 李明,陈大丽,朱颖. 装配刚度不均匀性对航空发动机整机振动的影响[J]. 价值工程, 2014(16): 65-67.
LI Ming, CHEN Dali, ZHU Ying. Research on the construction project with quality earned value method[J]. Value Engineering, 2014(16): 65-67.
- [8] WANG Zifu, ZHANG Zhijing, CHEN Xiao, et al. An optimization method of precision assembly process based

- on the relative entropy evaluation of the stress distribution[J]. *Entropy*, 2020, 22(2): 137.
- [9] ZHANG Qiushuang, ZHANG Zhongqing, JIN Xin, et al. Entropy-based method for evaluating spatial distribution of form errors for precision assembly[J]. *Precision Engineering*, 2019, 60: 374-382.
- [10] CHEN Xiao, JIN Xin, SHANG Ke, et al. Entropy-based method to evaluate contact-pressure distribution for assembly-accuracy stability prediction[J]. *Entropy*, 2019, 21(3): 322.
- [11] 布斯劳 G, 德赫斯特 P, 耐特 W. 面向制造与装配的产品设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- BOOTHROYD G, DEWHURST P, KNIGHT W. *Product design for manufacture and assembly*[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [12] SUN Qingchao, ZHAO Binbin, LIU Xin, et al. Assembling deviation estimation based on the real mating status of assembly. *Computer-Aided Design*, 2019, 115: 244-255.
- [13] 机械科学研究总院. GB/T 1182-2008. 产品几何技术规范(GPS)几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Institute of Mechanical Science. GB/T 1182-2008. Geometrical product specifications (GPS) tolerances of form, orientation, location and run-out[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.
- [14] 杨志猛. 静密封界面接触行为分析与密封性能评价方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
- YANG Zhimeng. Study on contact behavior analysis of static sealing interface and sealing performance evaluation method[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [15] SUN Qingchao, LIU Xin, Mu Xiaokai, et al. Estimation for normal contact stiffness of joint surfaces by considering the variation of critical deformation. *Assembly Automation*, 2020, 40(3): 399-406.
- [16] MANDELBROT B B. *The Fractal geometry of nature*[D]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [17] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1966, 295(1442): 300-319.
- [18] GREENWOOD J A, TRIPP J H. The elastic contact of rough spheres[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1967, 34(1): 153-159.
- [19] PERSSON B N. Elastoplastic contact between randomly rough surfaces[J]. *Physrevlett*, 2001, 87(11): 116101.
- [20] PERSSON B N, Bucher F, Chiaia B. Elastic contact between randomly rough surfaces: Comparison of theory with numerical results[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(18): 184106.
- [21] KOMVOPOULOS K, CHOI D H. Elastic finite element analysis of multi-asperity contacts[J]. *Journal of Tribology*, 1992, 114(4): 823-831.
- [22] POLONSKY I A, KEER L M. A numerical method for solving rough contact problems based on the multi-level multi-summation and conjugate gradient techniques[J]. *Wear*, 1999, 231(2): 206-219.
- [23] JACQ C, NE Lias D, LORMAND G, et al. Development of a three-dimensional semi-analytical elastic-plastic contact code[J]. *Journal of Tribology*, 2002, 124(4): 653-667.
- [24] VAKIS A I, YASTREBOV V A, SCHEIBERT J, et al. Modeling and simulation in tribology across scales: An overview[J]. *Tribology International*, 2018, 125: 169-199.
- [25] 姚正华. 改进人工鱼群智能优化算法及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- YAO Zhenghua. Research on the modified artificial fish swarm intelligent optimization algorithm and its application[D]. Xuzhou: China Mining University, 2016.
- [26] BOOTHROYD G, ALTING L. Design for assembly and disassembly[C]. *Annals of the CIRP*, 1992, 41(2): 652-636.
- [27] 侯亦非, 洪军, 周朝宾, 等. 均化接触压力的螺栓连接结合面形状主动设计[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(12): 84-90.
- HOU Yifei, HONG Jun, ZHOU Chaobin, et al. Optimization design for bolted joint surface shape by contact pressure homogenization[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(12): 84-90.
- [28] LIN Qiyin, YANG N, HONG Jun, et al. An optimization design of contact interface material stiffness for improving the uniformity of the contact pressure[J]. *Journal of Tribology*, 2020, 142(6): 061502.
- [29] 刘检华, 宁汝新, 万毕乐, 等. 面向虚拟装配的复杂产品装配路径规划技术研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(9): 2003-2007.
- LIU Jianhua, NING Ruxin, WAN Bile, et al. Research of complex product assembly path planning in virtual assembly[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(9): 2003-2007.
- [30] 陈奇兵. 螺栓组装配工艺对应力场影响测试实验及有限元仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- CHEN Qibing. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [31] 夏平, 唐应时, 吴安如. 铆钉铆接装配应力的分析和计算[J]. *机械*, 2003, 30(4): 44-48.

- XIA Ping, TANG Yingshi, WU Anru. Prestressed analysis and calculation on rivets in riveted structure[J]. Machinery, 2003, 30(4): 44-48.
- [32] EGDALL I M. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system[J]. Optical Engineering, 1985, 24(2): 285-289.
- [33] FIGOSKI J W, SHRODE T E, MOORE G F. Computer-aided alignment of a wide-field three-mirror, unobscured, high-resolution[C]//Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 1989, 1049: 166-177.
- [34] 郭洪杰, 杜宝瑞, 赵建国, 等. 飞机智能化装配关键技术[J]. 航空制造技术, 2014(21): 44-46.
- GUO Hongjie, DU Baorui, ZHAO Jianguo, et al. Key technology on intelligent aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014 (21): 44-46.
-
- 作者简介: 巩浩, 男, 1992 年出生, 博士后。主要研究方向为螺纹高可靠性连接、精密装配。
- E-mail: gongh0220@bit.edu.cn
- 夏焕雄(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为多相流-多场耦合建模仿真、胶粘连接、精密装配。
- E-mail: hxia@bit.edu.cn