

# 几何量工业测量的现状与发展

李明<sup>1</sup>, 于冀平<sup>2</sup>

(1. 上海大学机电工程及自动学院 上海 200072; 2. 深圳市计量质量检测研究院 深圳 518055)

**摘要:**工业测量不仅是要获取产品质量状态信息,还将成为工业4.0等未来制造模式中的赛博化系统(CPS)的一个重要信息来源。然而,工业测量涉及到一个庞大的技术体系,包括误差/公差的定义、检测的方法、评定的方法、多种测量方法测量结果的比对、测量系统构建及能力评估、产品质量符合性判定及验收等,其背后则是一套完整的国家/国际标准以及严格的测量过程管理体系和产品验收流程。以产品的几何量质量及检测为对象,从计量/检测的原理和方法角度,基于目前最先进的质量设计和控制的理念与方法,探讨了工业测量背后的标准体系及其相关理论与方法。分析和研讨了现代工业测量技术及其发展中涉及的相关技术问题,国内外工业测量技术目前的应用现状,并对工业测量技术的发展进行了探讨。

**关键词:**工业测量;计量;质量;产品几何技术规范与验证;工业4.0

**中图分类号:** TH7 T-1 TB92 **文献标识码:** A B **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Status and development of geometric measurement in Industry

Li Ming<sup>1</sup>, Yu Jiping<sup>2</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Industrial measurement can not only obtain product quality status information, but also can be an important information source for cyber physical system (CPS) in Industrial 4.0. However, industrial measurement is a complex technical system, including the definition of error/tolerance, measurement and evaluation method, comparison between measured results from different measurement methods, measurement system development and its performance evaluation, determination and acceptance of product quality, and etc. Besides, there is a complete set of ISO/GB (GPS&V) standards, as well as strict measurement process management system and product acceptance process. Industrial measurement operator must follow these management system and process. Focusing on product geometry quality and measurement, this paper analyzes the metering/measuring principles and methods, theory and methods of advanced quality design and control, standard system and its related theory and methods in industry measurement, and etc. Some development directions of industrial measurement technology are also discussed.

**Keywords:** industrial measurement; metering; quality; geometrical production specification and verification (GPS & V); industrial 4.0

## 0 引言

测量是科学的眼睛、也是工程的眼睛,测量的重要性是显而易见的。随着人类工业化进程的加速,特别是信息化、智能化技术的高速发展和无可争议的应用前景。先进工业国家已在思考未来的工业模式,工业4.0、智能制造等新概念和模式层出不穷。

新的制造模式下,必然会给产品质量控制,包括测量技术提出新的要求。本文以产品几何量的质量和测量为对象来探讨相关的问题以及背后的理论和技术。其主要涉及到如下内容:

- 1) 工业测量与通常意义上的计量存在的技术和应用关系;
- 2) 工业测量的任务及工作内容;
- 3) 工业测量背后的理论基础及技术支撑体系;

- 4) 工业测量的过程管理, 以及其管理依据;
- 5) 工业测量结果的溯源、比对的方法;
- 6) 工业测量结果与产品验收的关系及应用方法;
- 7) 工业测量结果的应用方法;
- 8) 工业测量技术、及其现状及相关问题;
- 9) 不同工业测量系统、工具的应用;
- 10) 工业测量技术如何适应工业发展和应用需求。

从上述问题中, 可以看到一个比常规意义上的“计量”更为宽泛、更为复杂的体系<sup>[1]</sup>。

## 1 工业测量的核心任务和工业内容

国家计量技术规范《JJF1001-2011 通用计量术语及定义》将计量学定义为测量及其应用的科学。用这个定义去理解工业测量(或称为工业计量), 将有助于更好地理解工业测量/计量的内涵及其应用。表1所示为工业测量的主要任务和工作内容。

表1 工业测量的核心任务与主要工作内容

Table 1 The core task and main contents of industrial measurement

核心任务	任务来源	操作对象和内容	操作目标	备注
保证测量结果具有溯源性	计量管理	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 操作对象为标准器具/计量器具</li> <li>2. 操作对象为待检定和校准的专用测量器具/系统</li> <li>3. 操作内容为测量系统和器具的计量特性</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 通过量值传递来确保测量结果的准确性和有效性</li> <li>2. 测量系统的检定、标定、校准</li> <li>3. 通过测量不确定度的估算, 进行测量系统的能力评估</li> <li>4. 通过对测量不确定度表述的共识, 构建不同测量系统间测量结果的比对基础</li> </ol>	计量/校准操作
实现产品质量状态精准高效的获取	产品的设计、制造、质保、验收和服务等部门	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 操作对象为由工程图样或技术文件规范的, 具有非理想特性的实际工件</li> <li>2. 操作内容为几何量的各类误差, 包括单参数误差和综合误差</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 误差项绝对偏差数据的获取</li> <li>2. 相应制造工况下相对偏差/误差数据的获取</li> <li>3. 测量操作的规范、快速、精准和可控</li> </ol>	测量操作
测量数据的管理、分析及后续应用	产品的设计、制造、质保和验收等部门。也包括供应商和售后服务的要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 实测数据(包括测量不确定度)</li> <li>2. 经数据处理操作后得到的数据(包括由数据统计操作得到的能力参数, 如 <math>C_{MK}/C_{PK}</math> 等)</li> <li>3. 经深层次分析操作后得到的数据(包括与设计、工艺、检测和应用相关的分析数据)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 根据工程图样要求, 进行偏差/误差评定</li> <li>2. 基于误差评定结果和不确定度表述共识的技术指标符合性判定以及验收操作</li> <li>3. 掌控制造系统状态和产品的制造误差分布特性</li> <li>4. 基于实测数据的产品制造和装配工艺调整</li> <li>5. 产品质量的信息化管理与发布</li> <li>6. 与几何质量相关的设计与制造的优化与改进</li> </ol>	应用操作

从表1可以看到工业测量有别于常规意义上的计量操作, 其主要表现如下:

### 1) 对象的不同

计量的主要工作在于量值统一, 其主要检测对象一般是标准器或测量系统, 而工业测量则是测量系统的应用, 其对象主要为产品。而产品的多样性决定了工业测量的繁杂和难度。

### 2) 依据的不同

计量操作有着严格的规范体系, 针对标准器, 有《计量技术规范(JJF)》和《计量检定规程(JJG)》等。但至少在目前, 工业测量在绝大多数企业和应用现场, 并没有类似JJF和JJG的这类规范, 这也是目前工业测量过程中问题较多的主要根源。

### 3) 内容的不同

一般情况下, 计量操作的内容以单参数为主, 而工业测量还包括了许多综合参数的检测以及制造过程的信息, 但这方面的检测往往只需要相对测量。

### 4) 应用的不同

计量的结果大多应用于对标准器的检定和校准, 而工业测量除了测量结果同样需要溯源外, 还会被用于综合分析以反馈到设计和制造系统, 用于质量和成本的改进。

综合上述可以看到, 工业测量包含有更大范围和更为复杂的技术体系, 更涉及到了产品全生命周期。

## 2 几何量工业测量的技术体系和规范要求

从工业测量的要求和具体操作流程来看, 其涉及到的相关技术和主要操作包括以下几个方面。

### 2.1 测量任务及其规范方法

对于产品几何量测量而言, 其主要测量对象为工件上几何要素的几何特性, 宏观方面的几何特性包括几何要素的大小、形状、方向、位置等方面的误/偏差以及其综合误差。微观方面的几何特性主要涉及到二维和三维的表面结构, 包括粗糙度、波纹度、表面纹理、表面缺陷以及

三维表面形貌等。近年来,与微观几何特性密切相关的感知误差也被明确地提了出来。从测量任务的角度看,对这些几何特性的测量要求,设计工程师必须明确地、完整地、规范地表达在工程图样/技术文件上。考虑到被测工件的实际误/偏差还会受到应用工况、环境、材料、装夹/装配等因素的影响,因此,对这些影响因素的约束同样必须在工程图样/技术文件中加以明确定义和规范表达。同时,由于同一几何特性的规范要求,可能存在着多种测量操作,包括测量方法、数据处理方法等,这可能会造成测量结果的多样性,甚至偏离设计方对几何质量的控制意愿。因此,必要时需要对测量操作进行相应的规范。目前,ISO/GB 产品几何技术规范与验证(geometrical production specification and verification, GPS&V)标准体系已明确给出了相应规范要求的表达方法<sup>[2]</sup>。总之,对于工业测量而言,特别是从目前制造业实际测量操作的情况来看,设计决定70%质量的说法,在工业测量领域也许同样有效。

## 2.2 测量数据精准获取的规范方法

按照工程图样/技术文件进行测量操作,即“按图施工”,一直是工业测量中最根本的原则,这一点被ISO/GB标准规定为对偶原则<sup>[3]</sup>。这种对偶涵盖了对误差和公差定义、测量方法、测量过程、数据处理方法等规范操作,表现为全方位对工程图样/技术文件规范的完全响应。为此,ISO/GB标准给出了针对测量的规范操作集。但ISO/GB标准给出的规范一般只是基础性、共性的和指导层面的,而对于千变万化的实际工件和测量任务,必将有许多的测量操作需要细化和进一步规范,其主要内容包括针对测量任务的具体测量方法和测量程序设计、测量系统的构建和能力要求、测量操作中相关工艺参数的设置等。所有这些,最终将形成一份完整的《测量技术规范(测量工艺文件)》<sup>[4]</sup>,它是测量结果精准有效的根本保障,更是测量数据可溯性和测量结果比对的依据。从这个规范文件的内容来看,有点类似计量操作中的JJF文件(计量技术规范)。

## 2.3 测量系统构建与能力评估的规范方法

基于已制订的《测量技术规范(测量工艺文件)》,构建符合要求的测量系统,并对测量系统进行不确定度估算和优化,最终确认测量系统的适用性<sup>[5]</sup>。不确定度估算须考虑的影响因素包括人、机、物、环、法等方面。这项操作将生成《测量过程规范(测量操作规范文件)》,它不仅将规范具体的测量操作,也是对实际测量操作进行过程管理的依据。从这个规范文件的内容来看,有点类似计量操作中的JJG文件(计量检定规程)。

## 2.4 测量数据应用的方法与规范

基于上述二份测量规范文件,精准有效的实测数据

还必须在规范可控的操作下才能得到。而后续对测量数据的分析处理以及应用,同样应该在相应的操作规范下操作。这些操作包括根据工程图样/技术文件规范进行的误差评定操作<sup>[6]</sup>;根据制造过程能力要求及控制规范进行的批量工件误差统计分析以及对过程能力( $C_p$ 、 $C_{pk}$ 等)的评估操作;根据制造系统能力( $C_{mk}$ 、 $P_{pk}$ 等)要求进行的制造系统状态获取、分析与监控操作;根据产品验收规范进行的产品几何质量符合性评定操作;根据设计优化过程规范进行的实际误差状况分析、评估和反馈操作等等。

上述几点是工业测量中最核心的内容,其中全部涉及到了“规范”。然而,国内许多企业在实际工业测量操作并没有基于相关规范在开展测量操作。事实上,《测量技术规范》和《测量过程规范》的制订恰恰是目前国内企业工业测量操作中被严重忽略的地方,其直接导致了测量过程的失控,测量数据可信度的下降,乃至产品质量的失控。

《测量技术规范》和《测量过程规范》的制订及其制订依据涉及到一个庞大的技术体系,需要引起足够的重视。

## 3 工业测量涉及的标准体系和规范方法

从工业测量的整个操作流程来看,其涉及到从误差/公差定义与规范、测量技术规范、测量过程规范、测量数据表达规范以及测量数据应用规范等多个方面,还包括在这一系列规范下开展的规范操作。同时测量结果的有效性必须建立在量值统一和对测量不确定度表述达成共识的基础上<sup>[7]</sup>。由此可以得出一个结论,对于测量而言,规范和标准是必不可少的。

此外,设计与制造都已进入数字化时代,几何量测量技术也进入了数字化时代,这就需要解决以往的那些几何量测量技术和方法与几何量数字测量技术之间的关系问题,特别是需要解决这些测量方法之间的量值统一和数据比对问题。

ISO从1995年开始,整整化了10年左右的时间,针对数字化技术的发展以及设计、制造、控制、验收与验证等方面技术发展和应用需求,开展了针对原有的“产品几何技术规范”及其标准体系的系统和全面的改造与重构。然后又化了近10年时间,进行了全面补充、扩展与完善。到目前已形成了由150多个标准组成的标准体系,其名称为“GPS&V”。

### 3.1 设计与验证的关联

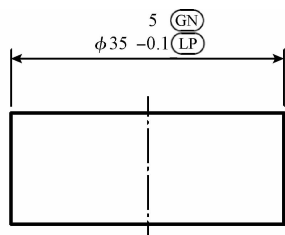
ISO/GB标准将设计与验证明确地进行了关联,特别是明确了设计方对测量与验收的责任,具体体现在给出了一系列可以由设计方规范的测量方法,图1所示为GPS&V标准体系中给出的涉及检测操作的相关符号示

意,其中图1(a1)所示为ISO 14405:2010标准中给出的规范测量方法的尺寸公差标注方法示意,这里的符号分别对应着局部(二点)尺寸和最小外接圆直径。图1(a2)所示为ISO 1101:2017标准中给出的圆柱度公差标注规范,它在圆柱度公差中规范了滤波的要求,包括滤波操作的截止波长等参数。图1(a3)所示为参照ISO涉及表面结构的相关标准标注的一个复杂的表面粗糙度标注案例示意。

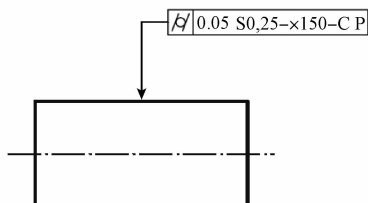
图1(b)表示在ISO 1101:2017标准规定的,可以在公差框格代号中规范的相关符号,其中,以C、CE等符号

分别用来规定误差区域和被测要素的拟合等操作方法。图1(c)所示为ISO 14405:2010标准中给出的有关功能尺寸规范的相关符号汇总。该标准中还给出了这些标注规范对应的检测操作方法。

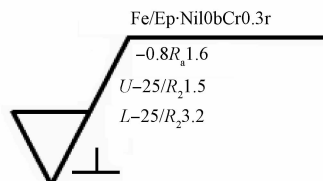
图1(d)所示为来自ISO 1101:2017标准的示例,其表示了由设计方规范的相应工况下的精度要求规范。图1(e)所示为来自ISO 1101:2017标准的三维公差标注示例,其几何公差框格代号后面关联的相关标注,进一步细化了和规范了被测要素的提取操作,其中,关于三维标注的表达规范则由ISO 16792:2015标准给出。



(a1) ISO14405:2010标准公差标注示意  
(a1) Tolerance example in ISO 14405:2010 standar



(a2) ISO1101:2017标准公差标注示意  
(a2) Tolerance example in ISO 1101:2017 standar



(a3) 复杂表面粗糙度标注示意  
(a3) Annotation of complex surface roughness

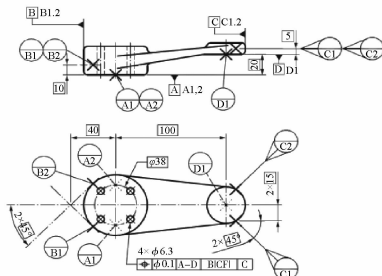
(a) 最新ISO标准给出的一些公差标注示意  
(a) Some tolerance examples described in the latest ISO standards

公差带					被测要素				特征		实体状态	状态
形状	宽度与范围	组合/独立	规定的偏置量	约束	滤波a		拟合	导出要素	拟合b	参数c		
					类型	嵌套指数						
φ	0.02	CZ	UZ+0.2	OZ	G	0.8	(C)	(A)	C CE CI	P	(M)	(F)
Sφ	0.02-0.01	SZ	UZ-0.3	VA	S	-250	(G)	(P)	G GE GI	V	(L)	
	0.1/75		UZ+0.1;+0.2	><	etc	0.8-250	(N)	(P) 25	X	T	(R)	
	0.1/75×75		UZ+0.2;-0.3			500	(T)	(P) 32-7	N	Q		
	0.2/φ4		UZ-0.2;-0.3			-15	(X)					
	0.2/75×30°					500-15						
	0.3/10×30°					etc						
1a	1b	2 <sup>d</sup>	3	4 <sup>d</sup>	5a	5b	6	7 <sup>d</sup>	8	9	10 <sup>d</sup>	11

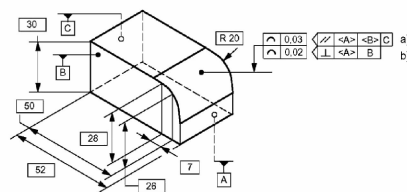
(b) 几何公差(框格代号)中涉及测量方法的相关符号示意图  
(b) Some symbolic examples in geometric tolerance frame

修饰符	说明
(LP)	二点尺寸
(LS)	由球定义的局部尺寸
(G)	最小二乘拟合尺寸
(G <sub>max</sub> )	最大内接拟合尺寸
(G <sub>min</sub> )	最小外接拟合尺寸
(C)	由周长计算的直径尺寸
(C <sub>max</sub> )	由面积计算的直径尺寸
(C <sub>min</sub> )	由体积计算的直径尺寸
(S <sub>max</sub> )	最大尺寸
(S <sub>min</sub> )	最小尺寸
(S <sub>av</sub> )	平均尺寸
(S <sub>mid</sub> )	中值尺寸
(S <sub>mid</sub> )	中间范围尺寸
(SR)	范围尺寸

(c) 功能尺寸及测量方法示意图  
(c) Examples of functional size and measurement



(d) 标注有工况要求的图样示例  
(d) Design examples with working conditions



(e) 三维公差标注的示例  
(e) Example of 3D tolerance

图1 产品几何技术规范 and 验证标准体系中涉及测量要求的符号示意图

Fig. 1 Some tolerance examples in GPS&V standards

### 3.2 测量操作的基本原则

GPS&V 标准体系给出了对偶等原则,既要求设计方在必要时明确给出检测方法规范,也要求检测方基于对偶要求,严格按设计要求和相关标准制订测量规范,并按规范控制整个测量操作过程。同时 GPS&V 标准体系也给出了缺省原则,并给出了在图样规范缺省情况下的测量操作方法。相关的原则和方法在 ISO 8015:2011、ISO 5459:2011 和 ISO 1101:2017 等标准中给出。而对测量过程的控制要求,则在 ISO 10012:2003/GB 19022-2003 中给出。

### 3.3 测量操作的规范流程

GPS&V 相关标准明确给出了测量操作的规范流程,即以操作集/操作算子的形式给出了明确的操作定义、操作方法及其规范流程,包括分离、提取、滤波、拟合、导出、评估、组合和构建等操作。其统一了基于同一几何量测量原理的二种具体测量方法的测量操作,这二种测量方法分别是基于实物标准器和基于虚拟标准器(数字)的测量方法,这就从根本上解决了以坐标测量技术为代表的数字化测量与其他测量方法的关系问题。典型的虚拟标准器包括 CAD 模型和用公式等表示的理想模型。这部分内容在 ISO 17450.1:2011、ISO 17450.2:2012(对应的国家标准在版本上有差异,具体为 GB/Z 24637.1-2009 和 GB/Z 24637.2-2009)和 ISO 14660.1:1999 和 ISO 14660.2:1999(对应的国家标准为 GB/T 18780.1:2002 和 GB/T 18780.2:2003)中给出。

### 3.4 符合性评定的依据和方法

GPS&V 相关标准明确给出了产品符合性评定的依据与方法,包括产品符合性评定的原则、测量不确定度估算方法和测量不确定度管理(优化)方法(process of uncertainty management, PUMA)流程、设计方和测量方对测量不确定度表述达成共识并签订验收协议的规范流程等。其核心是通过不确定度估算等数字化方法来界定测量系统的适用性,同时通过对测量不确定度表述达成共识的要求,进一步明确了设计方对产品质量符合性评定的责任,实现了从设计开始控制测量质量,进而控制产品质量的目标。这部分内容在 ISO 14253/GB 18779 系列标准中给出<sup>[8]</sup>。同时,许多相关行业也给出了相应的规范和标准<sup>[9]</sup>,如汽车领域的 ISO TS 16949:2015(对应的国家标准在版本上有差异,具体为 GB/T 18305:2003)标准给出了“测量系统分析”等方面的规范要求和相应的操作方法。全球轨道交通行业的“IRIS 02:2009 轨道交通行业质量管理体系”中也涉及到了“测量系统分析”的内容<sup>[10]</sup>。

### 3.5 工业测量结果的溯源方法

关于工业测量结果的溯源,ISO 从两个方面着手并

已制订了一系列标准<sup>[11]</sup>,除了原有针对一些常规计量器具的规范和标准外,ISO 10360/GB 16857 系列标准对以三坐标测量机为代表的数字化测量设备的检验与复检给出了规范方法<sup>[12-13]</sup>。同时考虑到实际测量工作的复杂性,还给出了面向测量任务的测量不确定度估算的规范方法,这部分内容在 ISO 15530/GB 24635 系列标准中给出,这个系列标准包括了运用已校准工件、专家系统、数值方法等进行面向测量任务的测量不确定度估算的规范方法等<sup>[14-15]</sup>。

### 3.6 给出了一系列数字化滤波和拟合方法

针对数字化测量技术的发展需求,GPS&V 相关标准给出了一系列的测量数据滤波和拟合的规范操作集,仅滤波标准,ISO 就给出了包括近 70 个标准在内的体系框架,许多具体标准已开始着手制订并颁发,这部分标准有许多涉及到微纳领域的测量和误差评定,特别是为三维表面形貌的测量提供了规范操作集。滤波的标准矩阵模型由 ISO 16610 系列标准给出。

从上述讨论的内容来看,ISO GPS&V 标准已形成了一套完整的理论和技术体系,同时也给出了一系列的规范原则和规范操作集。这些标准由 ISO TC213 制订,标准体系的名称为 GPS&V。此外,目前 ISO GPS&V 标准体系中的主要标准更是以差不多每年一版的速度在不断完善和发展中。而就我国的 GB 标准体系而言,尽管这些年做了一定的跟踪和转化工作,但无论在体系构建和标准年号等方面与国标 ISO 标准之间都存在着很大的差距,而这个差距也注定了国内工业测量的现状和水平,甚至直接反映了国内产品的质量水平。

## 4 几何量工业测量技术的应用现状

工业测量的需求和数字测量技术的发展,为数字制造和测量技术提供了创新机遇和坚实的技术支撑。近年来,工业测量始终围绕“测量到、测得了、测量准、测得快和测得省”的目标在高速发展。下面根据目前国内工业测量技术的研发与实际应用情况做一个汇总与分析。

### 4.1 面向高精度、全方位、高效率的测量需求

随着产品质量要求的提升以及设计制造技术的发展,工件的复杂程度已接近极致,这种极致不仅表现在工件上几何要素在空间方位、形状和深度等方面的复杂性,更涉及到极高的精度和测量效率等要求。对应着五轴数控加工技术,五轴扫描测量技术的突破,一直是工业测量界的一个梦。经过 10 多年的艰苦研发和实际应用提升,以雷尼绍连续扫描 5 轴坐标测量测头 REVO 为代表的五轴测量技术终于走向实用<sup>[16]</sup>,这归功于内空长结构的测

针挠度激光补偿技术和高速高精度五轴联动扫描测控技术的成功研发。这些技术的集成应用提供了几乎全空间的测量方位和高速扫描测量功能,有效地解决了包括发动机缸体(见图2(a))和盘式的叶片(见图2(b))在内

的一些高精度、高效率测量难题。同时,当 REVO 5 轴测量头与光学影像测量技术有机集成后,还有效地解决空间薄壁异形孔的测量问题,如航空发动机燃烧室壳体(见图2(c))中的空间薄壁孔位的快速精准测量难题<sup>[17]</sup>。



图2 五轴 REVO 测头的应用案例

Fig. 2 The application case studies of 5-axis REVO

#### 4.2 面向全尺寸的测量需求

相对于在原坐标测量技术上发展起来的五轴联动测量技术,工业 CT 测量技术的成功研发和应用从另一个角度实现了创新突破<sup>[18]</sup>。在无损情况下,通过对表征工件的全几何要素点群的获取,以及后续的软件处理,为工件真正的全尺寸检测(内外部所有几何特性)提供了有效的技术手段<sup>[19]</sup>。尽管目前在测量精度和测量效率方面还有待进一步的提高,但其在测量方面的技术优势正促

使其在更多的领域得到更为广泛的应用。目前,除了应用于一些浇铸件、压铸件、注塑件等对内外部几何质量同时有控制要求的工件测量外,在手机等 3C 行业,同样已有被应用于在线测量的案例<sup>[20]</sup>。

图3(a)所示为工业 CT 外形示意,图3(b)所示为工件上表征全几何要素的测点点群、被测要素拟合操作及基于理想要素(CAD 模型)的误差评定操作示意<sup>[21]</sup>。

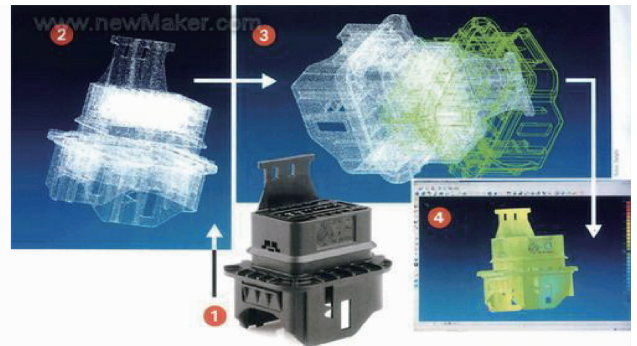


图3 工业 CT 及其测量操作过程

Fig. 3 Demonstration of industry CT and its measurement process

#### 4.3 面向高精度短小几何特征的测量需求

工件上有短小几何特征,如小倒角、小圆角、棱边等,这类测量要求是目前接触式扫描测量和线激光测量难以有效应对的,其高精度高效率测量一直是工业测量界的难题,随着 3C 和日用奢侈品(如高档手表)外观要求的不断提升,更是对这类测量提出了明确的要求,它也催生

了相关的技术创新。近年来,随着光谱共焦方法在测量中的应用,它不仅有效地实现了这类测量的功能,还能应用于在线检测,实现了全自动高精度小倒角、小圆角等的快速检测功能,解决了 3C 产品中多类工件的尺寸误差与几何误差测量难题<sup>[22]</sup>。

此外,同样基于光谱共焦方法的面光谱测量技术已

经出现,它将能同时满足三维表面结构的测量需求。在表面结构方面,扫描电镜等设备的应用也日益广泛。

#### 4.4 面向大视场高效、高精度的复杂形面的测量需求

随着高精度曲面应用的日益广泛,其测量,特别是现场快速测量要求也随之出现<sup>[23-24]</sup>,如汽车车身、飞机机身的快速测量要求等<sup>[25]</sup>。近年来包括影像、蓝光、白光和激光扫描技术在内的一大批光学测量技术的快速发展和有效应用,为复杂形面的高效测量提供了技术手段<sup>[26-27]</sup>。

特别是当这些技术与机器人等自动装置集成在一起,有效地扩展了测量范围、增加了测量操作的柔性和自动化程度<sup>[28]</sup>。目前,相当一部分自动化光学测量系统已作为在线测量系统,被广泛地应用在生产线上,成为生产过程控制的监控数据源<sup>[29]</sup>。此外,关节臂、基于光笔和靶标的摄影测量技术等,也已在许多领域有广泛的应用<sup>[30]</sup>。

图4所示为部分基于光学测量技术的测量系统及应用<sup>[31]</sup>。

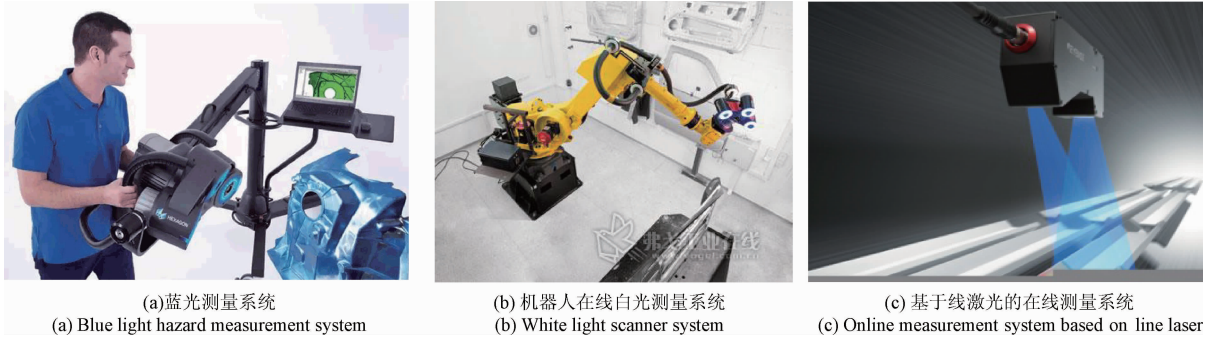


图4 光学测量技术及测量系统

Fig. 4 Some examples of optical measurement system

#### 4.5 面向大型、动态的测量需求

随着大型工件质量要求的日益提高,使得基于激光干涉仪和球坐标体系的激光跟踪测量技术得到了高速的发展和深度的应用<sup>[32]</sup>,激光跟踪仪由于其一次定位可以实现40 m左右的大范围高精度数字化测量,已在航空、航天、军工、船舶、建筑、轨交及大型机械等领域得到了广

泛的应用<sup>[33]</sup>。同时,由于这类测量方法还具有高精度跟踪测量功能,因此还被用于物体空间运动位置、速度/加速度等的测量<sup>[34-35]</sup>,如工业机器人的精度校准中就用了这一功能<sup>[36]</sup>。此外,它也可应用于变形、以及工件几何特性变化过程的测量。图5所示为激光跟踪仪的相关应用示意。

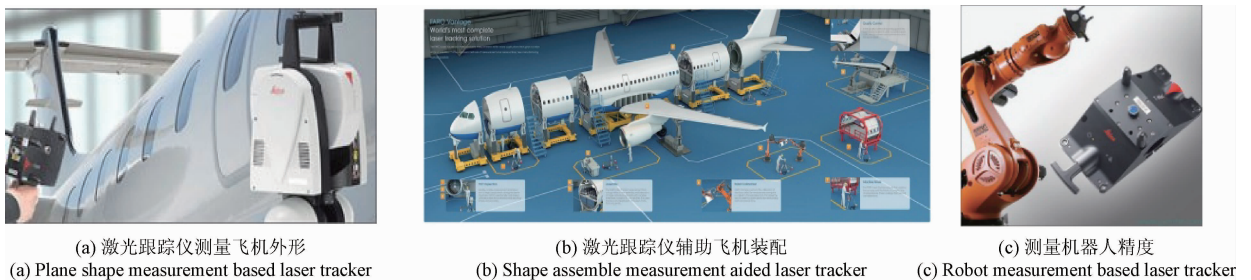


图5 激光跟踪仪的应用

Fig. 5 Application examples of laser tracker

图5(a)所示为配备了扫描装置的激光跟踪仪在快速高精度地检测飞机机身形面;图5(b)所示为多台激光跟踪仪组成的测量系统,为飞机机身对接提供实时空间方位测量监控;图5(c)所示为配备了空间方位检测附件的激光跟踪测量系统在检定工业机器人的空间动态精度,其检测内容包括空间定位精度、重复定位精度、移动轨迹方位(位置和空间方向)、速度和加速度等<sup>[37]</sup>。

近年了,德国 Eatlong 公司研发了基于多路激光测距冗余技术的跟踪测量系统(见图6(a)),该系统能为坐标测量机和五轴机床等装备的全空间精度检定提供高精度、动态的精度信息,这就为虚拟坐标测量机及五轴机床的空间精度补偿提供了技术支撑<sup>[38]</sup>。同时,该公司近年还研发了基于多路激光干涉绝对距离测量的高精度测量监控系统(见图6(b)),可用于大型高精度对象的微变形动态监控等。

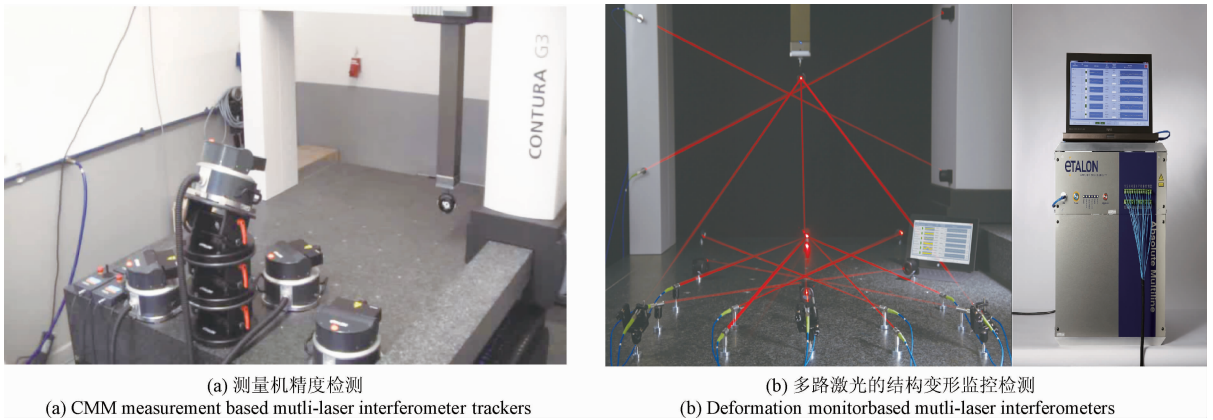


图6 德国 Eatlon 公司基于多路激光干涉测量的测量系统及应用

Fig.6 Measurement system based multi-laser interference provided by Eatlon Co. , Germany

#### 4.6 面向在线检测与质量实时控制的测量需求

在面对大批量生产的场合,制造工序的现场测量以及实时的反馈控制就变得极为重要<sup>[39]</sup>。这一方面需求促使高精度的坐标测量机走向生产现场,并成为自动生产线的一部分<sup>[40]</sup>。同时,大量的通用数字化测量装备以及专门构建的数字化测量系也大量应用于生产现场,其

中包括小型的数字化坐标测量机、激光测头以及各类高精度检测传感器和测量软件组成的测量系统,以执行特定测量对象的测量任务<sup>[41]</sup>。

在实际应用中,许多在线测量有时并不需要绝对测量,采用相对测量的目的在于监控制造工艺能力的变化,以便及时报警。图7所示为相关应用案例示意。

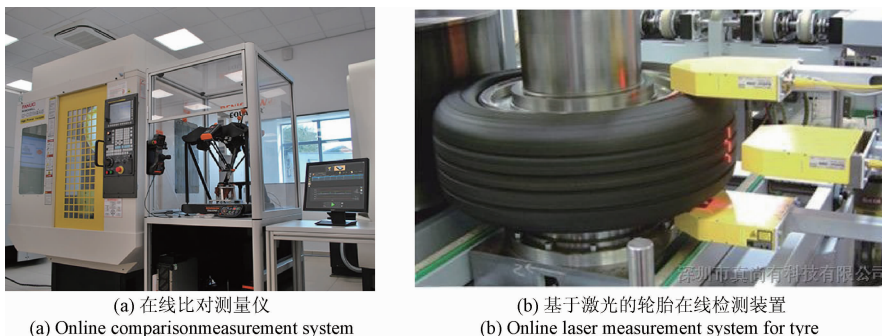


图7 数字化在线检测系统

Fig.7 Online numerical measurement system

#### 4.7 面向虚拟编程与验证的需求

基于CAD的数字测量编程与虚拟操作环境不仅仿真模拟了真实的测量环境和测量过程<sup>[42]</sup>,其还能直接导入测量任务,包括基于产品制造信息(product manufacture information, PMI)标注的公差信息,PMI技术的应用可以有效地提高了测量程序编制的效率和规范性,其核心技术在于测量任务的快速无损传递、测量任务的自动化规范生成<sup>[43]</sup>。其应用基础为相关的ISO标准,属于MBD(model based design)技术在测量方面的一个集成和信息化应用。在这方面,ISO和美国ANSI已有较为完整的标准在支撑该项技术的应用。

同时,完全仿真的测量场景,可帮助测量编程人员快

速验证测量程序的正确性,减少测量程序调试的时间。基于CAD的三坐标测量软件所编制的测量程序与不同测量系统的对接,由ISO 22093:2003(GB/T 26984-2011)提供的DMIS语言在测量软件层面实现接口功能。同时,I++DME接口标准则可以在测量设备层面实现这一功能。

#### 4.8 面向制造过程质量信息化需求

测量的目的不仅在于评定产品是否符合规范的要求,更是为了实现有效的过程控制,以及在制造系统状态稳定情况下的设计调整优化,以便进一步降低成本<sup>[44-45]</sup>。要有效解决这一问题的前提,首先是测量数据的管理,其次是测量数据的分析和应用<sup>[46]</sup>。为此,各大测量软件供



应商和数据应用平台纷纷推出相应的系统<sup>[47]</sup>,如德国 ZEISS 推出的 PI WEB 软件<sup>[48]</sup>。它提供了企业级测量机和相关测量仪器的集成应用管理、数据管理以及测量数据的深层次分析功能,包括统计分析和相关性分析,以及基于网络的信息发布等。海克斯康集团则推出了计量管理系统(measurement management system, MMS),如图 8 所示,它提供了企业级的测量过程和数据管理,并能与其他诸如 PDM 和 ERP 系统有效对接<sup>[36]</sup>,已成为企业信息化管理的一个重要组成部分。而基于西门子 TC 平台的 DPV 模块,其为以地毯图等形式表达的基于测量数据而形成的分析结果。它为测量结果的管理和应用提供了一个基于产品全生命周期质量的信息化管理平台<sup>[49]</sup>。



图 8 计量管理系统

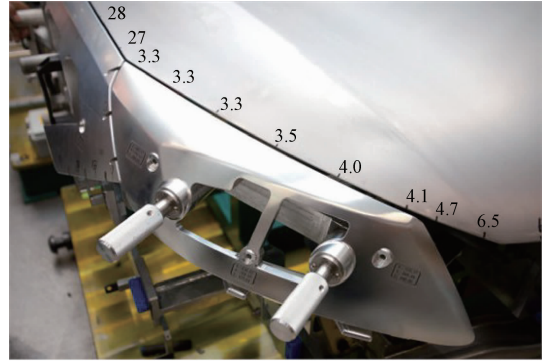
Fig. 8 Metering management system

#### 4.9 面向质量与成本平衡的测量需求

在大批量生产的产品中,如汽车的车身制造控制方面,检具(实物标准器)是一种常用的检测工具。还有一种匹配测量操作,它不是简单测量评定单个工件本身,而是考虑装配以后的实际精度状态。对于车身而言,主要测量面差、间隙、对齐以及对称等方面的相对空间误差,并根据误差和工件制造工艺状态,确定工件调整和装配工艺调整的策略。匹配操作可以在相关的实际工件装配后开展。也可在工件与标准器之间装配后开展,业内一般将用以检测装配组件内周侧的检测标准器称为 Cubing(见图 9(a))。检测装配组件外周侧的检测标准器称为 Meisterbock(见图 9(b))。

近年来,为了节约匹配操作标准器和检具的制作成本以及加快研发进程,各汽车主机厂已在展开基于激光扫描和 CAD 匹配软件的虚拟匹配技术研发。

上述所汇总的测量技术讨论未完全展开,同时所列举的案例也未包含目前所有的测量技术与装备。读者可以根据上述的一些测量技术关键词搜索并获取进一步信息,或从设备供应商、相关网站上获得进一步详细的信息。比较前沿的产品信息可从德国 CONTROL 展的相关网站信息获取。



(a) Cubing



(b) Meisterbock

图 9 实物匹配操作中的标准器

Fig. 9 The standard body in matching operate based on physical parts

## 5 对几何量工业计量技术发展方向探讨

工业 4.0 等未来制造模式的提出,给工业测量提出了更高的要求,为响应工业测量中高精度、高效率、高柔性、高集成、全方位、全样本等方面的技术需求,未来的工业测量技术可能会围绕着以下几个方向发展。

### 5.1 高精、高效、高柔性和全尺寸的测量要需求

光学测量结合空间五轴测量技术,以及工业 CT 测量技术将是未来工业测量的两大技术支柱,与这两个技术相伴的还有测量软件系统,要重点解决的问题包括五轴测量的自动编程,以及海量测点的处理和误差评定技术等。

### 5.2 面向自动化与高度柔性的现场应用需求

在未来,测量系统走向现场是必然的,测量系统与自动生产线、机器人等自动化装备的集成应用必不可少,这种高柔性快速集成的技术基础之一就是接口标准。同时,在这类测量系统的应用中,面向测量任务的测量系统校准和检测定技术是实际应用中的关键技术。

### 5.3 面向微纳领域的测量需求

在微纳领域,当宏观和微观几何特性之间的边界已完

全模糊的情况下,误差/公差定义、测量操作、误差评定等方面技术规范和标准的建立将成为首先需要解决的问题。

#### 5.4 面向测量风险控制的需求

测量不确定估算和测量过程控制方法的研究和相关标准制订工作将进一步深化<sup>[50]</sup>,如对几何公差(包括单项误差和综合误差)的测量不确定度估算问题;复杂测量系统的测量不确定度估算问题<sup>[51-54]</sup>;大尺寸测量中的测量不确定度估算问题等。目前,ISO GPS&V 标准体系发展飞快,并在不断地完善与扩展中,基于产品全生命周期的风险控制标准已在制订中,测量操作的风险将是一个重点内容。

#### 5.5 面向数字双胞胎系统构建需求

在进一步提升基于 CAD 平台的测量软件功能的同时,测量系统的信息集成功能将在相关标准完善的基础上实现。其中包括 PMI、三维标注(ISO 16792)、DMIS 等标准和规范。所有这些标准最终将规范设计信息对测量操作的直接驱动过程,从而实现测量系统、测量操作和信息流的虚实对应。

此外,针对质量数字化工程的需求,美国专门推出了相关的质量信息架构标准:ANSI/QIF-2015,对质量信息的内容、传递和集成进行了相应的规范。

#### 5.6 面向测量结果分析应用需求

在精准的测量数据基础上,测量数据的深层次分析和相关性分析将成为重点。而这些操作同样将建立在相应的规范基础上。这类涉及工业大数据的标准和规范是新工业模式下测量数据成功运用的关键之一。

#### 5.7 面向测量人员技术素养需求

未来的工业测量需要由拥有相应知识体系和操作技能的从业人员。这可能同样需要通过相关的标准来界定,其中将涉及相应的知识体系、能力评估和认证的规范与标准。在这方面,美国 ASME Y14.5.2 标准给出了从事几何公差方面专业人员的知识体系,ISO 也曾有过面向数字测量人员基本要求的标准提案。可以说,这方面标准的构建与完善是必需的。同时基于标准,才会有相应的、有效的认证操作。

此外,系统化考虑质量问题已成为必然,测量及测量结果在其中的作用将是核心的。美国 ANSI/QIF-2015 标准,提出了质量信息架构的概念,就是从系统角度规范了从设计、制造、检测、验收到应用的质量控制方法以及信息化管理方法。其中涉及的理念和方法,值得思考。

## 6 结束语

工业测量,涉及到一个庞大的技术体系和应用体系,其核心是测量规范及其背后 GPS&V 标准体系提供的理

论、原则和通用的规范方法。这些内容为工业测量基础和操作依据。当面对复杂多变的工件时,还需要针对具体测量要求,根据 ISO/GB 标准所提供的原则与方法制订更详细的测量规范及验证流程就变得尤为重要,而这项工作的具体实施,必须通过企业的相关管理来实现,只有这样,才能快速有效地得到精准的测量数据。从这一点讲,未来工业测量技术的发展,除了测量系统自身能力的提升和完善外,更关键的发展将体现在企业对标准的理解和应用层面的规范上,这一点,对于中国制造业而言,当有着特殊的意义。

## 参考文献

- [1] 裘祖荣,石照耀,李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. 机械工程学报,2010,46(14):1-11.  
QIU Z R, SHI ZH Y, LI Y. Research on the development of measurement technology mechanical manufacture [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14):1-11.
- [2] TOTEVA P, VASILEVA D, MIHAYLOVA N. New standards in the field of geometrical product specifications[J]. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2014,12(2): 85-90.
- [3] NIELSEN H S. Recent developments in international organization for standardization geometrical product specification standards and strategic plans for future work[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013,227(5): 643-649.
- [4] 范巧成,田静,祝福,等. 简化的测量过程统计控制方法[J]. 计量学报,2012,33(3): 284-288.  
FAN Q CH, TIAN J, ZHU F, et al. The statistical control methods of the simplified measurement process[J]. Acta Metrologica Sinica,2012,33(3):284-288.
- [5] MORONI G, PETRO S. CMM measurement uncertainty reduction via sampling strategy optimization [C]. Proceedings of the 9th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2008: 373-380.
- [6] TOTEVA P, MIHAYLOVA N, VASSILEVA D. Implementation of the new standard in the field of geometrical product specifications in the republic of Bulgaria [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 657(1): 1001-1005.
- [7] MORONI G, PETRO S, POLONI W. Geometrical product specification and verification in additive manufacturing[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 157-160.
- [8] 陶靖轩,顾龙芳,宋明顺,等. 不等精度测量结果标准差的估计[J]. 计量学报,2012,33(1): 94-96.  
TAO J X, GU L F, SONG M SH, et al. Estimation of

- standard deviation in unequal precision measurement[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2012, 33(1): 94-96.
- [9] 焦永刚, 李中奎, 文惠民. 工业企业推进计量管理精细化的几点思考[J]. *计量与测试技术*, 2017, 44(4): 108-110.
- JIAO Y G, LI ZH K, WEN H M. Several thoughts on promoting refined metrological management by industrial enterprises[J]. *Metrology and Measurement Technique*, 2017, 44(4): 108-110.
- [10] GAPINSKI B. Evaluation of the measurement algorithm for out-of-roundness measurement with CMM[C]. 10th International Symposium on Measurement and Quality Control, 2010(1): 432-435.
- [11] 张停. 计量管理系统在工业生产中的应用[J]. *计量技术*, 2016(3): 64-66.
- ZHANG T. Application of measurement management system in industrial production [J]. *Measurement Technique*, 2016(3): 64-66.
- [12] HILLER J. Studies on measurement uncertainty and economy of dimensional computed tomography measurements on selected examples [J]. *Technisches Messen*, 2017, 84(5): 336-347.
- [13] FRANK M. Determination of the measurement uncertainty of coordinate measuring systems[J]. *Technisches Messen*, 2017, 84(5): 325-335.
- [14] 陈晓怀, 李红莉, 杨桥, 等. 坐标测量机面向任务的测量不确定度评定[J]. *计量学报*, 2015, 36(6): 579-583.
- CHEN X H, LI H L, YANG Q, et al. Task-oriented measurement uncertainty evaluation of coordinate measuring machine[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(6): 579-583.
- [15] 黄桂平, 王伟峰, 轩亚兵, 等. 工业摄影测量系统检定方法研究进展[J]. *中国测试*, 2015(7): 10-15.
- HUANG G P, WANG W F, XUAN Y B, et al. Research progress on calibrating methods of industrial photogrammetry system [J]. *China Measurement & Testing*, 2015(7): 10-15.
- [16] ZHAI R H, LIN W. Ultrasonic profiling measurement of 5-axis milling machine[C]. 3rd International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2009, 1(1): 426-428.
- [17] 郭峰. 坐标测量技术在航空制造中的应用[J]. *航空制造技术*, 2013, 439(19): 26-29.
- GUO F. Application of coordinate measuring technology in aviation manufacture [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 439(19): 26-29.
- [18] 卡尔·蔡司(上海)管理有限公司. 工业测量技术的领导者[J]. *航空制造技术*, 2013(7): 89.
- ZEISS. Leader in industrial measurement technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(7): 89.
- [19] MARTON L, NAGY, BIRO-AMBRUS Z, et al. Calibration and measurement processing for ultrasonic indoor mobile robot localization systems [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2015(1): 131-136.
- [20] 张祥春, 张鹭, 王俊涛. 工业 CT 技术在航空发动机单晶叶片壁厚测量中的应用[J]. *无损检测*, 2015, 37(2): 20-22.
- ZHANG X CH, ZHANG L, WANG J T. Application of industrial CT technology in measurement of single crystal blade of aero engine blade wall thickness [J]. *Nondestructive Testing*, 2015, 37(2): 20-22.
- [21] 宋旭, 施玉书, 宋小平, 等. 工业 CT 长度测量误差校准的探索研究[J]. *计量学报*, 2015, 36(3): 225-228.
- SONG X, SHI Y SH, SONG X P, et al. Exploratory research on the length measuring error calibration of industrial CT [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(3): 225-228.
- [22] 徐建午. 车身复杂曲面测量[J]. *装备制造技术*, 2015(12): 153-154.
- XU J W. Measure complicated curving plane in body [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2015(12): 153-154.
- [23] 范百兴, 谢孟利, 杨再华, 等. 工业测量全站仪坐标测量精度检定方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2015, 32(3): 226-230.
- FAN B X, XIE M L, YANG Z H, et al. Calibration method of industrial total station's coordinate accuracy measurement [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2015, 32(3): 226-230.
- [24] 陈刚, 胡祯. 大型测量台的大尺寸测量技术研究[J]. *中国计量*, 2014(3): 76-79.
- CHEN G, HU ZH. Research of large scale measurement technology for large scale measuring station [J]. *China Metrology*, 2014(3): 76-79.
- [25] 吴石, 李荣义, 刘献礼, 等. 基于自适应采样的曲面加工误差在机测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(1): 83-90.
- WU SH, LI R Y, LIU X L, et al. On-machine measurement method of processing error based on the mould surface adaptive sampling [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(1): 83-90.
- [26] 王道档, 邹慧, 郭天太, 等. 基于自校正的三坐标机二维平台误差测量技术[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(11): 2451-2457.

- WANG D D, ZOU H, GUO T T, et al. Error measurement technique for two-dimensional stage of three-coordinate measuring machine based on self-calibration algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2451-2457.
- [27] 何雪明, 孔丽娟, 何俊飞, 等. 基于三坐标测量机自适应测量的自由曲面逆向[J]. 机械工程学报, 2014, 50(15): 155-159.  
HE X M, KONG L J, HE J F, et al. Free-form surface reverse based on CMM self-adapting measurement[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15): 155-159.
- [28] 郭宝云. 工业零件形状与尺寸高精度视觉测量方法研究[J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 471-471.  
GUO B Y. Research on high-precision methods of visual measurement of the shape and size of the industrial parts[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 471-471.
- [29] 万聪灵, 余学才, 蒋波, 等. 线结构光双目传感器钢坯轮廓测量标定方法[J]. 计量学报, 2014, 35(1): 34-38.  
WAN C L, YU X C, JIANG B, et al. Calibration method for billet outline dimension measurement using linear-structure light with two-sensor[J]. Acta Metrologica Sinica, 2014, 35(1): 34-38.
- [30] 张铁, 戴孝亮, 杜亮. 基于距离测量的机器人误差标定及参数选定[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(5): 585-590.  
ZHANG T, DAI X L, DU L. Robot error calibration based on distance measurement with parameter selection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(5): 585-590.
- [31] 刘林航. 开创大尺寸精密测量领域的新纪元[J]. 航空制造技术, 2015(6): 101.  
LIU L H. Opening up a new era in the field of large scale precision measurement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(6): 101.
- [32] 潘廷耀, 范百兴, 易旺民, 等. 大尺寸动态测量技术综述[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(8): 70-72.  
PAN T Y, FAN B X, YI W M, et al. Overview of large-scale dynamic measurement metrology[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015, 38(8): 70-72.
- [33] 张东旭, 杨平, 毕果, 等. 磨削阶段大口径非球面拼接测量技术[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 22-29.  
ZHANG D X, YANG P, BI G, et al. Stitching measurement technique for large-aperture aspheric surface during grinding process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 22-29.
- [34] 刘霜. Leica 6D 测量技术在航空大尺寸检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 4(13): 65-66.  
LIU SH. Application of 6D measurement technology in large scale inspection of aviation, [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 4(13): 65-66.
- [35] 刘霜. 工业现场新型 6D 大尺寸自动化测量技术[J]. 航空制造技术, 2012(11): 86-87.  
LIU SH. New large-scale 6D automatic measurement technology in industrial field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(11): 86-87.
- [36] 林嘉睿, 祁继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 463-468.  
LIN J R, ZHU J G, ZHANG H L, et al. Field valuation of laser tracker angle measurement error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 463-468.
- [37] 倪爱晶, 郑联语. 基于形状误差不确定度的大尺寸测量系统优化配置方法[J]. 计量学报, 2011, 32(4): 289-295.  
NI AI J, ZHENG L Y. Optimal configuration method for based on form large-scale measurement systems error ainty uncertainty [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(4): 289-295.
- [38] BALLU A, YAN X, BLANCHARD A, et al. Virtual metrology laboratory for e-learning [J]. Procedia Cirp, 2016, 43(1): 148-153.
- [39] 肖胜兵, 高振宇. 基于数字摄影原理的汽车车身三维测量技术[J]. 机械工程师, 2013(8): 103-104.  
XIAO SH B, GAO ZH Y. Three dimensional measurement technology of automobile body based on digital photography principle[J]. Mechanical Engineer, 2013(8): 103-104.
- [40] 王鹏, 孙长库, 张子森. 单目视觉位姿测量的线性求解[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1126-1131.  
WANG P, SUN CH K, ZHANG Z M. Linear poseestimation with a monocular vision system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1126-1131.
- [41] 李琳. 自主创新 工业 4.0 时代的测试测量[J]. 现代制造, 2015(25): 24.  
LI L. Innovation on measurement of industry 4.0 [J]. Modern Manufacturing, 2015(25): 24.
- [42] 卡尔·蔡司(上海)管理有限公司. 工业 4.0 测量技术新变革[J]. 世界制造技术与装备市场, 2015(2): 118.  
ZEISS. Measurement technology innovation in industrial 4.0 [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2015(2): 118.
- [43] 乔昱. 工业测量数据的三维模型显示[J]. 信息系统工程, 2017(5): 22-23.

- QIAO Y. 3D model display of industrial measurement data[J]. Information System Engineering, 2017(5): 22-23.
- [44] 海克斯康测量技术(青岛)有限公司. 360°SMIS 智能检测方案[J]. 汽车制造业, 2016(23): 77.
- HEXAGON. 360°SMIS intelligent detection scheme[J]. Automobile Industry, 2016(23): 77.
- [45] ANNEDORE M. 精确的测量方法是工业 4.0 的基础[J]. 现代制造, 2016(11): 42-43.
- ANNEDORE M. The exact method of measurement is the basis of industry 4.0 [J]. Modern Manufacturing, 2016(11): 42-43.
- [46] 邵蕊. 温泽测量: 率先向工业 4.0 的智能化解解决流程进发[J]. 机械工程师, 2015(6): 54-56.
- SHAO R. WENZEL: Take the lead in the intelligent process of industrial 4.0 [J]. Modern Components, 2015(6): 54-56.
- [47] 海克斯康测量技术(青岛)有限公司. 为大数据时代最新的工业标准规范提供最全面的测试测量解决方案[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(4): 1321.
- HEXAGON. Provide the most comprehensive test and measurement solution for the latest industrial standards and specifications in the big data age [J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(4): 1321.
- [48] 卡尔·蔡司(上海)管理有限公司. 工业测量技术助力全球航空科技[J]. 现代制造, 2016(10): 98.
- ZEISS. Industrial measurement technology helps global aviation technology [J]. Modern Manufacturing, 2016(10): 98.
- [49] 中良. 工业 4.0 下的智能测量系统[J]. 汽车工艺师, 2016(10): 38-39.
- ZHONG L. Intelligent measurement system in industry 4.0 [J]. Automotive technologist, 2016(10): 38-39.
- [50] 许铖, 熊会元, 宗志坚, 等. 基于测量臂构型的单点残余差修正方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 775-780.
- XU Y, XIONG H Y, ZONG ZH J, et al. Single-point residual correction method for multi-joint arm based on pose configuration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 775-780.
- [51] 潘国荣, 郭巍, 周跃寅. 基于误差分解定权的工业测量空间线面拟合算法[J]. 计量学报, 2015, 36(5): 469-472.
- PAN G R, GUO W, ZHOU Y Y. Industrial measurement fitting algorithm for space line/plane based on error decomposition weighting [J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(5): 469-472.
- [52] 许景波, 袁珍宝, 刘泊, 等. 圆度测量中高斯滤波的逼近实现方法[J]. 计量学报, 2012, 33(1): 16-20.
- XU J B, YUAN Y B, LIU B, et al. Approximation implementation approach for gaussian filtering in roundness measurement [J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(1): 16-20.
- [53] 蔺小军, 李宜明, 李政辉, 等. 叶片型面测量编程与误差处理技术[J]. 计量学报, 2013, 34(2): 128-133.
- LIN X J, LI Y M, LI ZH H, et al. The blade surface measurement programming and error processing skill [J]. Acta Metrologica Sinica, 2013, 34(2): 128-133.
- [54] 蔺小军, 王增强, 史耀耀. 平面复杂曲线轮廓度误差评定和判别[J]. 计量学报, 2011, 32(3): 227-234.
- LIN X J, WANG Z Q, SHI Y Y. Evaluation and identification of the profile errors of complicated plane curve [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(3): 227-234.

## 作者简介



李明, 1984 年于上海工业大学获学士学位, 1997 年于上海大学获硕士学位, 现为上海大学教授, 主要研究方向为产品几何质量设计与控制、几何技术标准化。

E-mail: robotlib@shu.edu.cn

Li Ming received his B. Sc. degree from Shanghai University of Technology in 1984, received his M. Sc. degree from Shanghai University in 1997. Now he is a professor in Shanghai University. His main research interests include product geometric quality design, control and standardization



于冀平, 1985 年毕业于北京广播电视大学(大专学历), 现为深圳市计量质量检测研究院几何量计量测试所所长、教授级高工, 主要研究方向为长度计量和标准化。

E-mail: yujiping@smq.com.cn

Yu Jiping graduated from Beijing Open University in 1985 (Junior degree). Now he is a professor in Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection. His main research interest is Metrology and standardization.