

测量设备数字化建模技术研究

于普, 潘超*, 张学涛, 孙安斌

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对缺乏系统化测量设备虚拟模型构建方法的现状, 本研究团队提出一种基于功能-结构-运动复合模型的测量设备数字化建模方法。通过解析测量原理、功能、操作流程, 明确设备测量能力, 构建功能模型; 拆解设备结构组成, 根据分层结构关系进行部件装配, 构建结构模型; 分析机构自由度与运动学约束, 建立与功能关联的运动机构, 构建运动模型。以三坐标测量机为例进行应用验证, 结果表明: 该方法能够有效模拟测量设备的可测可达空间、运动轨迹及干涉情况, 支撑可测可达性分析与测量路径规划, 为模拟测量及未来远程计量应用奠定技术基础。

关键词: 测量设备; 数字化建模; 功能模型; 结构模型; 运动模型; 模拟测量; 三坐标测量机; 远程计量
中图分类号: TB9; TP391.9; TH86 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 03-0132-12

Research on digital modeling technology for measurement equipment

YU Pu, PAN Chao*, ZHANG Xuetao, SUN Anbin

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To address the current lack of systematic methods for constructing virtual models of measurement equipment, a digital modeling method for measurement equipment based on a function-structure-motion composite model is proposed. By analyzing the measurement principle, function, and operational procedure, the measurement capability of the equipment is clarified and a functional model is constructed. The structural composition of the equipment is disassembled, and the components are assembled according to the hierarchical structural relationships to build a structural model. The degrees of freedom and kinematic constraints of the mechanism are analyzed, and the motion mechanisms associated with the functions are established to construct a motion model. A coordinate measuring machine is taken as an example for application verification. The results show that this method can effectively simulate the measurable and reachable workspace, motion trajectory, and interference conditions of the measurement equipment, support reachability analysis and measurement path planning, and lay a technical foundation for simulated measurement and future remote metrology applications.

Key words: measurement equipment; digital modeling; functional model; structural model; kinematic model; simulation measurement; coordinate measuring machine

0 引言

智能制造已成为制造业重要发展方向, 建模

技术是智能制造的重要组成部分^[1], 其核心是实现物理系统与数字空间数据的互融互通, 构建多学科、多物理量、多尺度、多概念的实物仿真模型

收稿日期: 2026-03-30; 修回日期: 2026-05-27; 录用日期: 2026-05-28; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 国家“十四五”基础预研项目(MJZ3-XXXX)

引用格式: 于普, 潘超, 张学涛, 等. 测量设备数字化建模技术研究[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 132-143.

Citation: YU P, PAN C, ZHANG X T, et al. Research on digital modeling technology for measurement equipment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 132-143.



可为智能制造提供技术支持^[2-3]。2002年,美国密歇根大学教授GRIEVES M提出虚拟映射的概念^[4],即“与物理产品等价的虚拟数字化表达”,对产品信息和数据进行全生命周期管理。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在Apollo计划中应用虚拟映射的概念^[5],对飞行中的空间飞行器构建状态模型,从而进行仿真分析。

虚拟映射在测量领域中的应用原理为:建立设备融合模型和数据采集传输及管理模型^[6],将高精度传感数据与物理实体的运行机理有效深度结合,通过模拟测量获得产品质量状态评估和结果表达^[7-9]。目前仪器建模的对象包括机械臂、三坐标测量机、关节臂测量机、数控铣床的加工刀具等。2020年,印度库马拉古鲁理工学院的MOHAN M S教授通过机械臂运动模拟仿真^[10]检测机械臂末端定位精度。2024年,印度马德拉斯理工学院的NAYAK P K教授建立了数控铣床中刀具与被加工齿轮的结构模型与加工过程模型^[11],通过加工仿真来分析齿面偏差。国内研究方面,2020年,复旦大学吕浩宇、孔令保将坐标测量机与干涉仪结合进行运动测量仿真模型分析^[12],实现了测头位置误差的检测与分析。2022年,昆明理工大学曾志江等人构建关节臂式坐标测量机运动学模型^[13],基于D-H(Denavit-Hartenberg)参数法实现了关节空间和测头空间坐标系的变换仿真。上述研究为推动虚拟映射测量技术发展提供了一定技术支撑,但现有研究多侧重局部建模或数据融合,缺乏从测量原理出发的层次化、体系化建模框架,导致模型碎片化、可测性评估能力不足。

在测量领域,检测设计能力是关键要素,它既是制造水平的基础支撑,又是提质增效的关键突破口^[14]。然而,在现有的检测设计中,轨迹规划通常以产品模型为核心^[15-16],缺乏对测量设备模型运动轨迹及干涉情况的系统考虑,导致在检测设计的可测可达性分析、测量路径规划等场景中,未能充分发挥常规测量设备模型的仿真分析作用;同时,现有设备建模方法多聚焦于单一功能或局部结构^[17-18],缺乏从测量原理到设备测量行为的系统性描述,极大限制了模拟测量技术的应用边界。

针对上述问题,本文以典型几何量测量设备为对象,提出一种系统化的测量设备数字化建模方案。从测量设备的工作原理、系统结构、测量能力等核心要素出发,构建集功能模型、结构模型、运动模型于一体的测量设备模型,为测量不确定度预测、检测方案优化提供关键工具,并为智能制造业的数字孪生分析提供底层模型支撑。

1 测量设备数字化建模方案

测量设备数字化建模技术的系统逻辑框架如图1所示,从功能模型、结构模型与运动模型三个维度构建测量设备模型,三者层层递进,形成从抽象到具体的完整建模逻辑。

以测量设备的测量原理、功能、操作流程为起点,依次构建设备功能模型描述设备测量能力、设备结构模型映射设备物理特性、运动模型刻画设备动态行为,形成功能-结构-运动模型递进的建模链条,形成系统化的测量设备建模方案。首先,从基础属性、性能约束、功能执行三个层级构建功能模型,描述设备核心测量逻辑;然后,以功能部件为主,将设备实体结构划分为功能关联结构和非功能关联结构,根据分层结构关系进行部件装配,通过三维参数化建模的方式构建结构模型;最后,依据坐标变换矩阵原理进行运动仿真,依次确定运动部件数量、运动副数量、驱动数量、约束数量及约束条件数量,根据运动机构自由度计算公式,使机构自由度为0,构建设备运动模型。

2 测量设备功能模型构建

2.1 功能模型构建方法

功能模型对测量设备的测量能力进行结构化表达,描述设备的基础属性、测量功能、操作流程、测量原理及技术指标,如表1所示。

基础属性层描述设备的身份信息,即设备的基础属性,具体包括设备名称、应用领域、测量对象、测量参数、设备类别(按结构)、系统组成(按功能模块)等。该层是测量设备的“数字化档案”,为行为建模和性能建模提供基础支撑。

性能约束层界定设备测量能力的边界条件,主要由测量原理和技术指标构成。其中,测量原

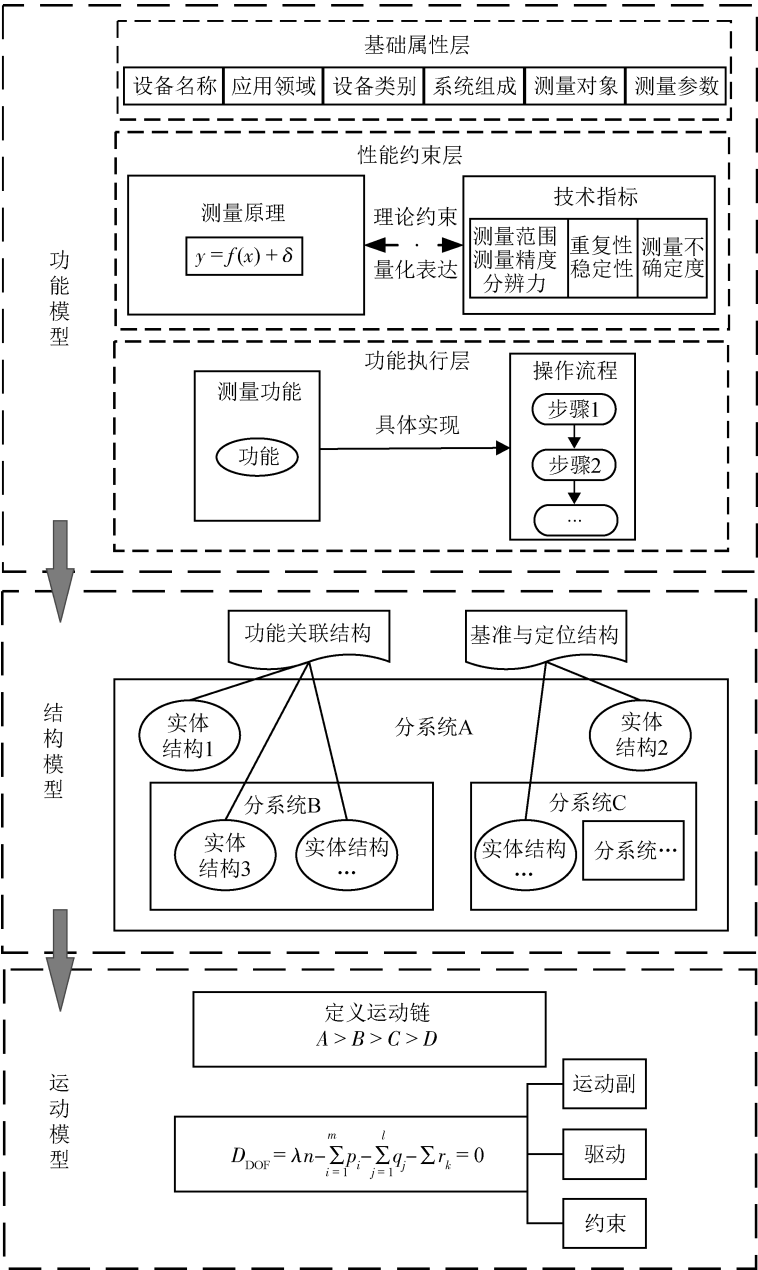


图1 测量设备模型系统架构
Fig.1 Measurement equipment functional model architecture

表1 测量设备功能模型定义表
Tab.1 Definition of functional model for measuring equipment

层级	内容
基础属性层	设备名称、应用领域、设备类别、系统组成、测量对象、测量参数
性能约束层	测量原理、测量范围、测量精度、分辨力、重复性、稳定性、测量不确定度
功能执行层	测量功能、操作流程

理用“输入-状态转换-输出”的数学模型表达，记为

$$y = f(x) + \delta \tag{1}$$

式中： y 为测量结果， x 为被测量， $f(x)$ 为测量系统的传递函数， δ 为测量误差。

技术指标包括测量范围、测量精度、分辨力、重复性、稳定性和测量不确定度等，将设备测量能力的表达方式由定性描述转化为定量约束。

功能执行层描述测量设备执行测量任务的过程，主要包括测量功能和操作流程。测量功能中列出设备具备的测量能力清单；操作流程是实现某项测量能力执行的操作步骤，实现从静态能力定义到动态行为执行的映射。

2.2 功能模型构建实例

以三坐标测量机为建模对象，构建其功能模型。通过基本信息表或基本信息图的形式描述其基本属性。某型号坐标测量机的基本信息如表2所示。

表2 某型号坐标测量机基本信息表

Tab.2 Basic information for a certain type of coordinate measuring machine

名称	应用领域	测量对象	测量参数	设备类别	系统组成
某型号坐标测量机	几何量计量	零件和自由曲面	尺寸和形位参数	桥式	主机机械结构、测头系统、硬件控制系统、软件数据处理系统

三坐标测量机通过获取被测要素表面点的空间坐标，实现对被测物体几何特征的精确表征，其测量步骤包括测头定位、测量点采集、数据处理等，构成从要素采集到完整评定的操作流程^[19-20]。具体测量原理为：三坐标测量机获取机器坐标系下的位置数据并将其转换为零件坐标，之后对零件坐标进行几何特征拟合。在测量空间内，三坐标测量机控制器控制三轴(X轴、Y轴、Z轴)进行平移运动和测头系统(测头长度为L)的旋转运动，其中旋转角为(α, β)，从而到达指定位置P_A(X_a, Y_a, Z_a, α, β)，测头接触被测物进行测量，经坐标变换得到

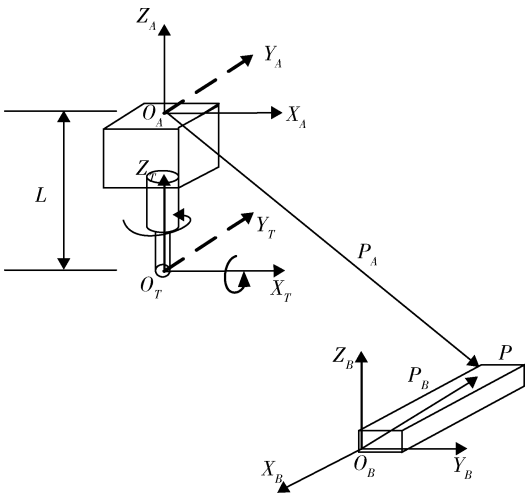


图2 三坐标测量机测量原理

Fig.2 Measuring principle of coordinate measuring machine

表3 技术指标
Tab.3 Technical indicators

测量行程X×Y×Z	旋转范围/(°)	
	测头A	测头B
500 mm×700 mm×500 mm	0~105	-180~180

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & X_0 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & Y_0 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix}$ 为机器坐标系下被测点的位置，

$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$ 为坐标系旋转矩阵， $\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$ 为坐标系

平移矩阵， $\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}$ 为零件坐标系下被测点的位置。

得到机器坐标系下测头的中心坐标点的坐标值P_B(X_b, Y_b, Z_b)，同时接触测头(测头半径为R)会给出触发的方向向量，该触发向量用于测头半径补偿，如图2所示。具体技术指标如表3所示。

3 测量设备结构模型构建

3.1 结构模型构建方法

结构模型通过三维参数化建模还原测量设备的物理特性，包括机械部件及其连接关系。测量设备结构建模主要包括部件分解、参数化设计和装配约束3个关键环节：

1) 部件分解

将测量设备拆分为功能明确的子组件，便于

逐级建模与装配分析，核心子组件包括基座、关节、探头等；辅助子组件包括外壳、夹具、工作台等。

依据设备的结构构型、测量坐标系、几何误差独立性等因素，将测量设备按运动系统划分为若干分系统。在此基础上，分析分系统之间的运动关联关系，构建设备单输入-单输出的运动链条。

根据设备的测量原理、功能和操作流程，在各分系统中采用自顶向下的方式对实体结构进行逐层分解(依次拆分到组部件级与零件级)，并按照是否直接参与设备功能执行划分功能关联结构和非功能关联结构(即基准与定位结构)。

2) 参数化设计

测量设备的参数化设计是指在其结构模型构建时，基于实际物理特性定义各部件的几何尺寸、材料特性及性能指标，获得可动态调整模型的设计过程，如表4所示。

表4 参数化设计表
Tab.4 Parameterized design table

参数类型	定义内容
几何尺寸	部件的长、宽、高、直径、行程等
材料特性	密度、弹性模量、热膨胀系数、耐磨性等
性能指标	测量范围、精度、分辨力等

结构模型构建时，在建模软件中定义参数化模型，进行尺寸驱动修改；并进行参数关联设计，避免出现干涉问题。

对性能指标进行参数化表达，将测量范围、精度、分辨力等技术指标转化为一组可度量的几何量，并通过数学关系式建立映射，进而利用CAD系统的参数驱动机制，使几何模型能够动态反映上述指标的变化，从而在几何层面实现对测量设备性能的量化表达与动态验证。

3) 装配约束

以功能部件为核心，按分层结构定义连接关系与运动约束。其中，关键约束类型有：几何约束、运动约束、功能约束等^[21]。

结构建模是测量设备建模的基础，也是后续运动建模的几何框架。通过参数化建模与约束装配，可高效实现测量设备结构的数字化构建，为

后续仿真、优化及检测提供基础。

3.2 结构模型构建实例

根据三坐标测量机测量功能和机械结构的特点，可以把它分解成若干个部件，分别构建这些部件的模型。

根据测量功能分解出设备运动部件。Y轴包括左右立柱和横梁，其中，右立柱在底座上做平移运动，左立柱下有气浮导轨起支撑作用；X轴滑块在横梁上做平移运动；Z轴部件在X轴上做与XY平面垂直的平移运动；测头系统在Z轴立柱上做俯仰抬高旋转运动和围绕Z轴的旋转运动，以实现测量功能。确定运动部件的技术指标，例如三轴的行程范围和测头的旋转范围等。功能结构分解如图3所示。

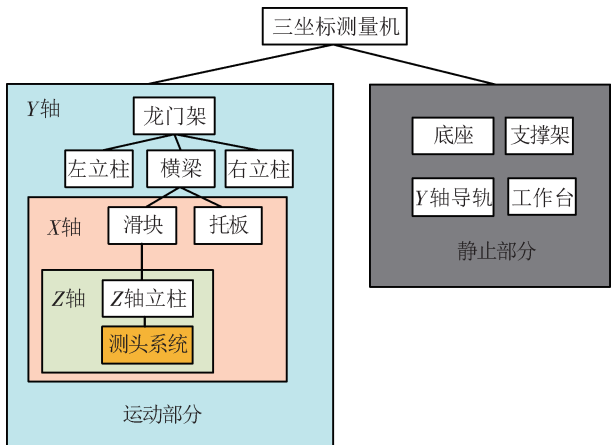


图3 三坐标测量机功能结构分解
Fig.3 Functional structure decomposition of coordinate measuring machine

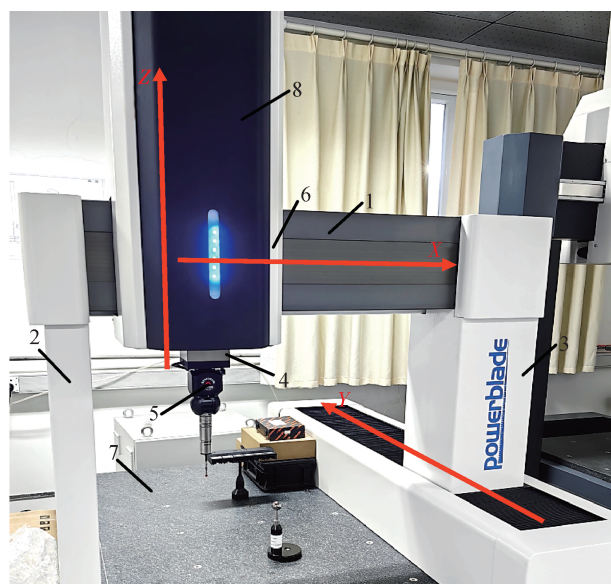
以某型号龙门式三坐标的功能模型为例，其实体结构如图4所示，包括功能关联结和基准与定位结构。

对部件模型进行参数化表达，描述部件的尺寸、结构、外形和性能指标信息，再按照分层结构自底向上依次装配。装配关系如图5所示。

4 测量设备运动模型构建

4.1 运动模型构建方法

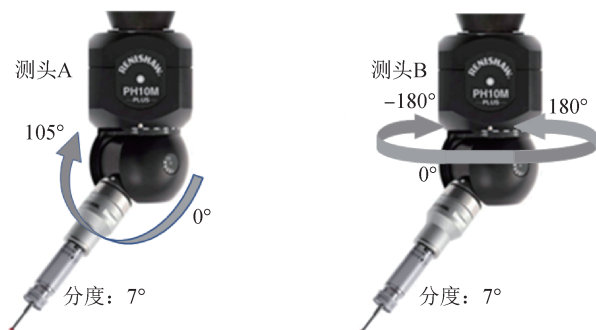
运动模型基于多体运动学理论，通过定义自由度 D_{DOF} 与运动学方程描述测量设备的运动特性。通过驱动与约束设计，使 $D_{DOF} = 0$ ，满足功能运动



注：功能关联结构包括1-横梁，2-左立柱，3-右立柱(沿Y轴运动)，4-测头立柱(沿Z轴运动)，5-测头系统(做旋转运动)，6-滑块(沿X轴运动)；关联关系为 $Y > X > Z > \alpha > \beta$ ；基准与定位结构包括7-固定底座(固定不动)，8-Z轴壳体(随X轴运动)。

(a) 坐标测量机平移轴实体结构

(a) Physical structure of the translation axis of a coordinate measuring machine



(b) 坐标测量机旋转轴实体结构

(b) Solid structure of the rotary axis of a coordinate measuring machine

图4 某型号龙门式三坐标测量机

Fig.4 A certain type of gantry coordinate measuring machine

需求；并利用坐标变换矩阵对测量设备组成部件的相对运动关系和空间位姿变化进行数学描述。构建测量设备运动模型的具体建模步骤如下：

1) 建立坐标系

确定系统中的固定零件与末端零件，其中固定零件一般为基座，末端零件为执行器、测头等。以固定零件为参考基准，建立测量设备系统坐

标系。

2) 位姿描述

在系统坐标系下，用齐次变换矩阵描述运动部件的位置坐标与姿态。

3) 定义运动副与运动关系

根据结构模型的部件分解定义运动链，确定运动部件与运动副，标注驱动关节。相邻部件通过运动副连接，限制相对运动。根据实际运动类型，定义每个运动副的几何约束与自由运动方向，常见运动副包括移动副、旋转副、圆柱副、球副等。

根据结构模型的参数化设计设定约束条件，定义几何约束，设定运动范围。

输入驱动函数，如速度曲线、位置轨迹等。在运动建模中，测量设备运动模式可归纳为直线、旋转等基础运动及其复合形式^[22]，如周期性往复运动、齿轮啮合运动、轨迹跟踪运动等，其运动学特性通过输入驱动参数与输出响应的传递关系进行表征^[23]。

4) D_{DOF} 计算

基于改进的 Grübler-Kutzbach 公式计算机构自由度，各个部件之间的相对运动必须受到足够的约束，以确保整个机构能够按照预定的轨迹和方式运动。 D_{DOF} 计算公式为

$$D_{\text{DOF}} = \lambda n - \sum_{i=1}^m p_i - \sum_{j=1}^l q_j - \sum r_k = 0 \quad (3)$$

式中： λ 为空间维度（平面机构 $\lambda = 3$ ，空间机构 $\lambda = 6$ ）， m 为运动副数量， l 为驱动数量， p_i 为约束数目， q_j 为约束条件数目， r_k 为除当前约束外的约束条件数目。

5) 运动学分析

在已知关节输入量的条件下，求解每个运动部件相对于全局坐标系的位姿，其中输入量包括平移量 (x, y, z) 和旋转量 θ 。从固定部件开始，依次应用相邻部件间的坐标变换，最终得到末端部件的位置与姿态。

使用坐标变换矩阵建立正运动学变换模型，相邻关节间的齐次变换矩阵 T_i^{i-1} 为

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \alpha_{i-1} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \alpha_{i-1} \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

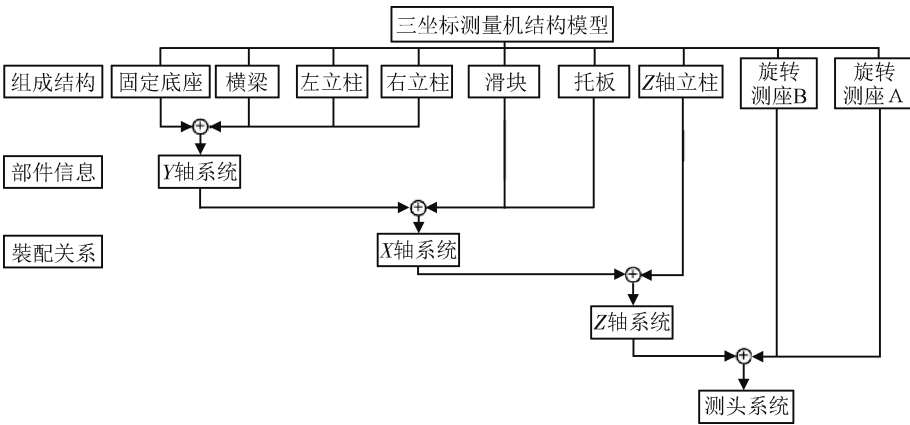


图5 三坐标测量机装配关系

Fig.5 Assembly relationship of coordinate measuring machine

式中： θ_i 为关节角， α_{i-1} 为连杆长度， d_i 为关节偏距。通过关节参数计算末端位姿， $T_0^n = T_0^1 T_1^2 \cdots T_{n-1}^n$ 。

4.2 运动模型建模实例

构建三坐标测量机运动模型，使机构的自由

度为0。各个部件之间的相对运动必须受到足够的约束，以确保整个机构能够按照预定的轨迹和方式运动。其中， $\lambda = 6$ ， $n = 5$ ， $j = 5$ ， $l = 5$ ， $p_i = 10$ ， $q_j = 20$ ， $r_k = 0$ ，运动部件及其约束关系如表5所示。

表5 三坐标测量机运动部件和约束关系

Tab.5 Moving parts and constraint relations of coordinate measuring machine

序号	执行量	单元	约束	运动副	驱动
0	基准量	底座	固定约束		
1	Y执行单元	横梁、左立柱、右立柱、滑块、Z轴立柱、测头系统	平行于底座基准面，且沿Y向轴线运动	平移副	长度驱动
2	X执行单元	滑块、Z轴立柱、测头系统	平行于龙门架组成的平面，且沿横梁轴线方向运动	平移副	长度驱动
3	Z执行单元	Z轴立柱、测头系统	垂直于底座基准面，且沿基准面的法线方向运动	平移副	长度驱动
4	β 角执行单元	旋转测座B、旋转测座A	平行于Z轴立柱底面，并绕其轴线方向做旋转运动	旋转副	角度驱动
5	α 角执行单元	旋转测座A	垂直于测头底座平面，并绕横梁轴线方向做旋转运动	旋转副	角度驱动

5 测量设备建模结果

以三坐标测量机为研究对象，基于CATIA平台构建融合刚体运动学理论的三维数字样机模型，按照如图6所示的设备模型结构树，设计了如图7所示的三坐标测量机模型。该模型精确表征XYZ三轴平移导轨、测座A和测座B的角旋转机构等核心运动部件的几何特征与公差参数，并采用分层

树法装配技术建立父子层级约束关系，实现运动链与支撑结构的空间位姿同步。

在运动学建模中，依据刚体运动学理论建立包含平移、旋转及缩放变换的齐次坐标变换矩阵，通过数字样机DMU(Digital Mock-Up)运动机构模块模拟三轴线性运动与测头双摆角运动的复合自由度特性，如图8所示。通过运动学变换矩阵的级联运算，量化多轴联动下的测头空间位姿映射关系，

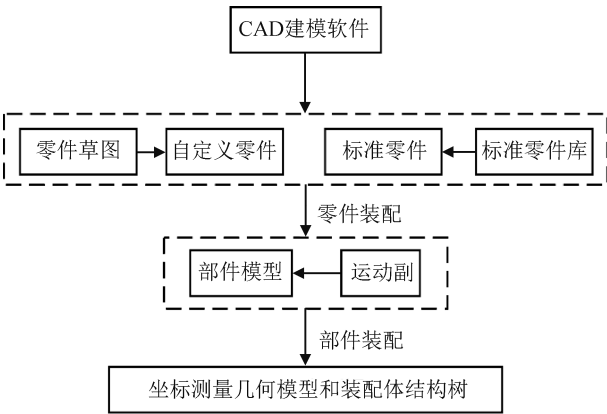


图6 三坐标测量机模型装配流程

Fig.6 Coordinate measuring machine model assembly process

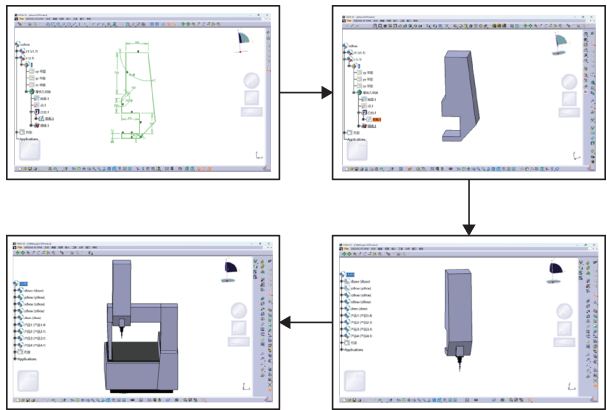


图7 三坐标测量机模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of coordinate measuring machine model

为测量路径规划与动态误差分析提供了可验证的虚拟仿真模型，参数化建模框架显著提升了设备模型的工程适配性与运动学仿真可信度。按照运动、结构和功能模型构建的三坐标测量机仪器模型如图所示，能够根据输入的关节改变量到达指

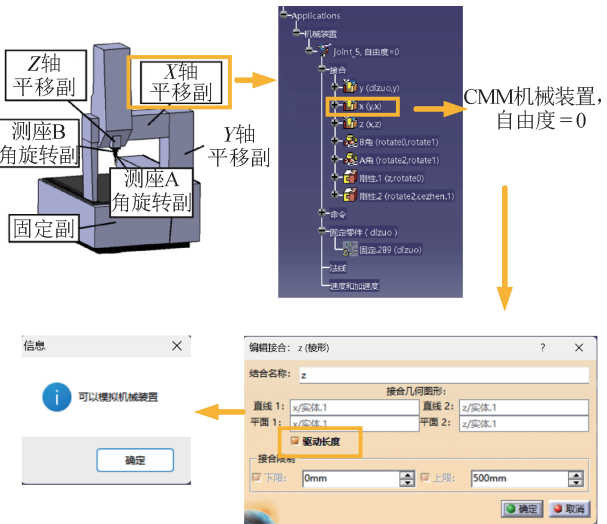


图8 CATIA DMU 运动机构建模过程

Fig.8 CATIA DMU motion mechanism modeling process

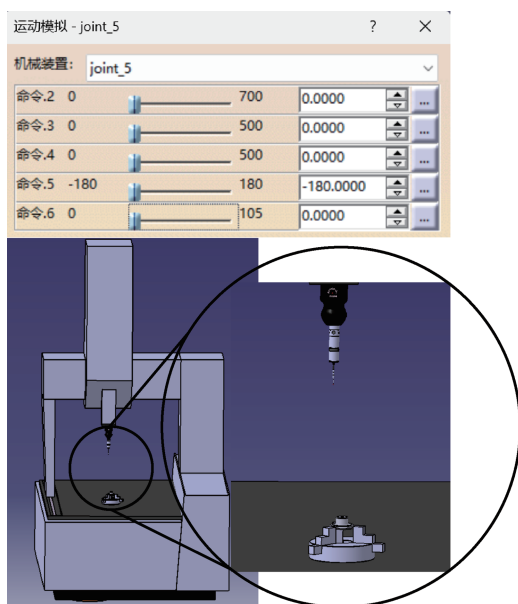
定位置，建模结果如图9所示，运动参数驱动如表6所示。

针对轴套类零件内径与外径的坐标测量过程，开展可测性与可达性分析。采用三爪卡盘作为夹持装置，对零件进行装夹，并模拟坐标测量机测针的检测路径。仿真测量结果表明：在当前装夹姿态下，测针仅能有效触及零件外圆柱表面，实现对外径尺寸的采样；而内径测点均处于测针可达空间之外。进一步分析发现，若保持测针末端在测量空间中的位姿不变且不改变零件装夹角度，测针杆部将与零件端面或孔壁发生干涉，导致内径特征无法被测量；改变测针空间角度后，干涉现象依然存在，如图10(a)和图10(b)所示，表明在单一夹持姿态下，轴套类零件的内径不具备可测性。为实现内径测量，需将零件绕轴向翻转

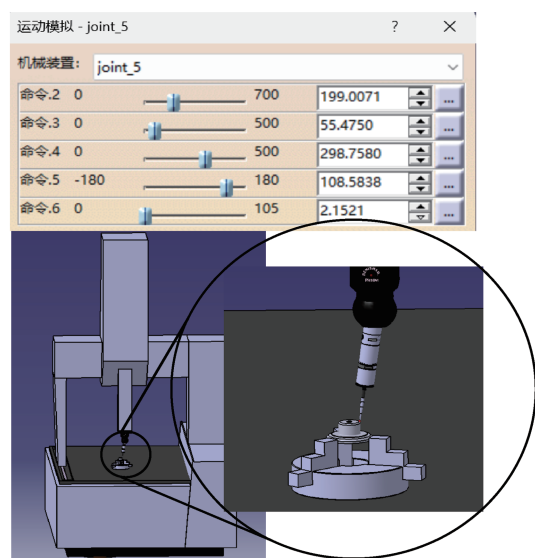
表6 三坐标测量机模拟测量参数驱动表

Tab.6 Parameter-driven table for CMM simulation measurement

三坐标测量机运动系统	输入长度值/mm	输入角度值/(°)	末端测球初始位置/mm	末端测球初始角度/(°)	末端测球测量位置/mm	末端测球测量角度/(°)
Y轴平移系统	199.007 1		0		199.007 1	
X轴平移系统	55.475 0		0		55.475 0	
Z轴平移系统	298.758 0		0		298.758 0	
β 角旋转系统		288.583 8		-180		108.583 8
α 角旋转系统		2.152 1		0		2.152 1



(a) 三坐标测量机初始位置
(a) Initial position of the coordinate measuring machine



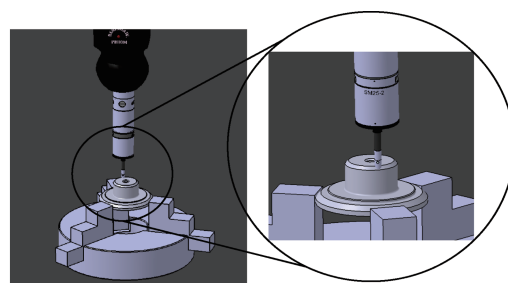
(b) 三坐标测量机测量位置
(b) Measurement position of the coordinate measuring machine

图9 测量设备模型模拟测量结果

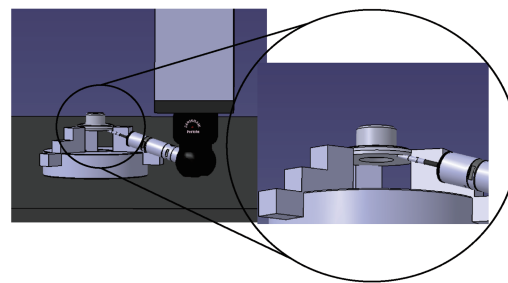
Fig.9 Simulation measurement results of the measurement equipment model

180°后重新夹持,此时原内孔表面暴露于测针可达域内,方可完成内径数据的采集,如图10(c)所示,可测可达位置关节输入值如表7所示。

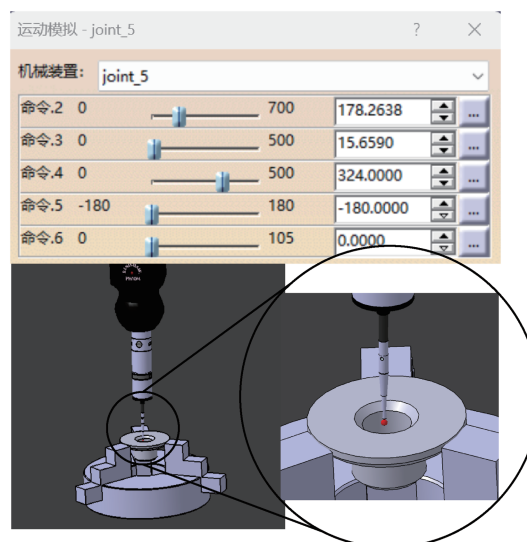
基于上述可测性与可达性分析,可得出如下结论:通过建立坐标测量机、三爪卡盘与轴套类零件的设备与装夹模型,能够有效模拟测针在测量空间中的运动轨迹与干涉情况。仿真结果表明:测量设备模型具备对可测性与可达性进行系统分



(a) 三坐标测量机干涉位置1
(a) Interference position 1 of the coordinate measuring machine



(b) 三坐标测量机干涉位置2
(b) Interference position 2 of the coordinate measuring machine



(c) 三坐标测量机可测可达位
(c) Measurable and reachable positions of the coordinate measuring machine

图10 可测可达性分析结果

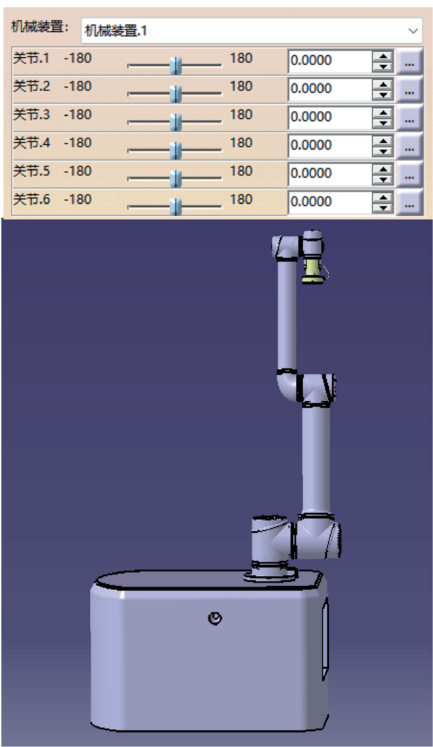
Fig.10 Measurability and reachability analysis results

析的能力,可为复杂零件测量路径规划与检测设计提供理论依据。

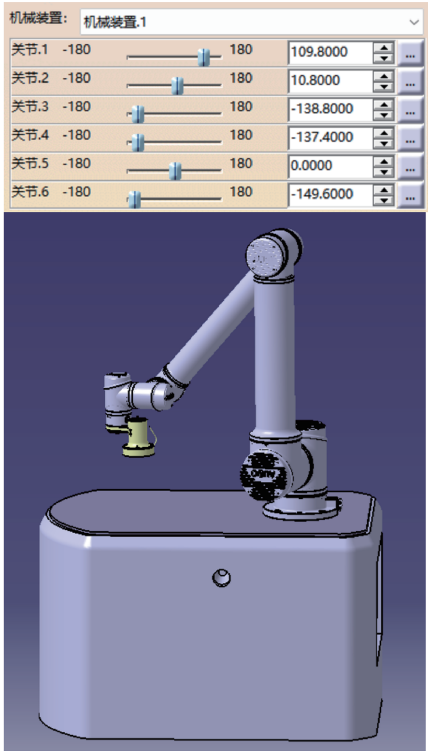
此外,该测量设备数字化建模方法具有通用性,对于六轴机器人等复杂测量系统,型按照功能-结构-运动复合框架构建其模,得到如图11所示的六轴机器人测量系统。因此,该建模方法为数字化建模提供了一套统一、可复用的理论工具。

表7 三坐标测量机可测可达性参数驱动表
Tab.7 Parameter-driven table for CMM measurability and reachability

三坐标测量机运动系统	输入长度值/mm	输入角度值/(°)	末端测球初始位置/mm	末端测球初始角度/(°)	末端测球测量位置/mm	末端测球测量角度/(°)
Y轴平移系统	178.263 8		0		178.263 8	
X轴平移系统	15.659 0		0		15.659 0	
Z轴平移系统	324.000 0		0		324.000 0	
β 角旋转系统		180		-180		0
α 角旋转系统		0		0		0



(a) 六轴机器人测量系统初始位置
(a) Initial position of the six-axis robot measurment system



(b) 六轴机器人测量系统测量位置
(b) Measurement position of the six-axis robot measurement system

图11 六轴机器人测量系统
Fig.11 Six-axis robotic measurement system

6 结论

本研究团队提出了一种面向测量设备的系统化建模方法，其技术框架包含三个递进式建模阶段。在功能模型构建中，采用模块化分解策略，通过解析测量设备的测量原理、功能特性与操作规范构建基础信息模块，将实体结构划分为功能关联模块与非功能关联模块，并建立功能模块和

性能约束以实现测量设备功能映射，为后续建模提供理论支撑。结构建模阶段基于分层装配原理，通过拓扑关系定义功能部件的空间位姿约束，形成可扩展的装配体系。运动建模通过齐次坐标变换矩阵法实现多体系统运动学仿真，结合运动副、驱动及约束条件量化分析，建立自由度平衡方程，确保机构运动确定性。

通过调整测量设备模型的运动参数可以进行

轨迹规划与仿真测量：通过自定义运动轨迹评估测量空间可达性；利用实测坐标数据构建离线仿真环境，实现物理测量过程的数字化映射。该方法突破了传统建模中几何特征与运动特性分离的局限性，形成了参数驱动的一体化建模流程。研究表明：该建模体系显著提升了测量设备模型的工程适用性，结构化功能模型与参数化装配机制为复杂测量系统的快速构建提供了技术基础。通过运动学仿真与离线验证的闭环迭代，有效解决了测量路径规划中的干涉检测与可达性验证问题。研究成果为测量设备模型的数字化设计与优化建立了可复用的方法论框架，为后续智能测量设备的虚拟调试与数字孪生系统开发奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 李明章, 盛永民, 鞠新星, 等. 数字化测量在航空制造中的应用与发展研究[J]. 教练机, 2021(2): 13-18, 59.
LI M Z, SHENG Y M, JU X X, et al. Research on application and development of digital measurement in aviation manufacturing[J]. Trainer, 2021(2): 13-18, 59. (in Chinese)
- [2] 隋少春, 朱绪胜. 飞机整机装配质量数字化测量技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(11): 1449-1460.
SUI S C, ZHU X S. Digital measurement technology for aircraft final assembly quality[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 50(11): 1449-1460. (in Chinese)
- [3] 刘宇轩, 郭蔡果荟, 于翀, 等. 基于数字孪生的机械设备运行状态监测技术研究综述[J]. 计测技术, 2025, 45(5): 48-67.
LIU Y X, GUO C G H, YU C, et al. Review of research on condition monitoring technology for mechanical equipment based on digital twin[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(5): 48-67. (in Chinese)
- [4] GRIEVES M. Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking[M]. New York: McGraw Hill Professional, 2005.
- [5] National Aeronautics and Space Administration. NASA space technology roadmaps and priorities: restoring NASA's technological edge and paving the way for a new era in space[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2012.
- [6] WANG W X, LIU Y Q, CHAI X D, et al. Industrial Internet-based industrial chain digital twin system framework and information model[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2024, 25(7): 951-967.
- [7] LI J, KOO J, LEE J, et al. AI agent-based virtual model development, diagnosis, and calibration for building digital twins[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2025, 48: 100990.
- [8] SOLANES E J, FALIP F A, GRACIA L, et al. Bridging virtual and physical realms in industrial metaverses for enhanced process control[J]. Information, 2026, 17(1): 71.
- [9] ZHANG H, LI Y, ZHANG S, et al. Artificial intelligence-enhanced digital twin systems engineering towards the industrial metaverse in the era of industry 5.0[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025, 38(1): 40.
- [10] MOHAN M S, ANBUMALAR V, KUMARAN S T. Kinematic modelling and simulation of PID controlled SCARA robot with multiple tool end effector[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2020, 35(1): 9-19.
- [11] NAYAK P K, SAMUEL G L, SHUNMUGAM M S. Mathematical modeling and simulation of generation milling process to manufacture complex face gear surface through multi-axis machine kinematics[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 110: 361-375.
- [12] 吕浩宇, 孔令保. 基于三自由度激光干涉仪的坐标测量机动态误差建模与仿真[C]//中国光学与应用光学光子学会议论文集, 2020.
LYU H Y, KONG L B. Dynamic error modeling and simulation of coordinate measuring machine based on three-degree-of-freedom laser interferometer[C]// Proceedings of China Optics and Applied Optics Photonics Conference, 2020. (in Chinese)
- [13] 曾志江, 高贯斌, 马文金. 关节臂式坐标测量机热误差仿真建模及补偿[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(3): 50-54.
ZENG Z J, GAO G B, MA W J. Thermal error simulation modeling and compensation of articulated arm coordinate measuring machine[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(3): 50-54. (in Chinese)
- [14] 陈燕, 王禹封, 譙木, 等. 数字孪生在制造业中实现的

- 关键技术及典型应用综述[J]. 航空制造技术, 2024, 67(11): 24-45.
- CHEN Y, WANG Y F, QIAO M, et al. Review of key technologies and typical applications of digital twin implementation in manufacturing industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(11): 24-45. (in Chinese)
- [15] 冯丹艳, 潘平盛, 黎志勇, 等. 基于3D打印的工业设计可视化研究[J]. 轻工科技, 2025, 41(4): 168-175.
- FENG D Y, PAN P S, LI Z Y, et al. Research on visualization of industrial creative design based on 3D printing[J]. Light Industry Science and Technology, 2025, 41(4): 168-175. (in Chinese)
- [16] HE X W, WAN L B, ZHANG B, et al. Research of the technology and application of process digital mock-up for spacecraft assembly based on the MBD[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3513(1037): 447-452.
- [17] 张仟, 谢冬和. 基于逆向软件的涡轮叶片数字化建模[J]. 智能制造, 2025, 32(3): 76-81.
- ZHANG Q, XIE D H. Digital modeling of turbine blade based on reverse software [J]. Intelligent Manufacturing, 2025, 32(3): 76-81. (in Chinese)
- [18] 王军. 飞机钣金零件的数字化建模及逆向验证[J]. 中国新技术新产品, 2021(11): 42-44, 91.
- WANG J. Digital modeling and reverse verification of aircraft sheet metal parts [J]. China New Technologies and New Products, 2021(11): 42-44, 91. (in Chinese)
- [19] 欧阳婷婷, 刘延平, 彭江涛, 等. 基于三坐标测量机的曲面轮廓度坐标测量技术[J]. 航天制造技术, 2020(2): 4-8.
- OUYANG T T, LIU Y P, PENG J T, et al. Coordinate measurement technology of surface profile based on coordinate measuring machine [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2020(2): 4-8. (in Chinese)
- [20] 李富强, 陈鹏, 谢吉庆, 等. 大半径小圆弧几何特征的精确测量方法[J]. 计测技术, 2025, 45(5): 40-47.
- LI F Q, CHEN P, XIE J Q, et al. Precise measurement method for geometric features of large radius small arc [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(5): 40-47. (in Chinese)
- [21] 张开富, 史越, 骆彬, 等. 大型飞机装配中的高精度测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 52-69.
- ZHANG K F, SHI Y, LUO B, et al. Research progress of high-precision measurement technology in large aircraft assembly [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 52-69. (in Chinese)
- [22] 庆旭昆, 员海玮, 丁镇军. 新型液压球头轴承动态特性数字化建模方法[J]. 机械制造与自动化, 2025(2): 160-164.
- QING X K, YUN H W, DING Z J. Digital modeling method for dynamic characteristics of new hydraulic ball head bearing [J]. Mechanical Manufacturing & Automation, 2025(2): 160-164. (in Chinese)
- [23] 江文松, 王妍, 罗哉, 等. 六自由度机器人末端位姿校准误差链路分析[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 48-55.
- JIANG W S, WANG Y, LUO Z, et al. Error chain analysis of end pose calibration for six-degree-of-freedom robot [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 48-55. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一作者: 于普(1998—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为设备建模技术。



通信作者: 潘超(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为数字化检测。