DOI: 10.3901/JME.2019.24.028

一种全站仪免置平实现的刚体六自由度测量方法*

赵祚喜^{1,2} 宋俊文¹ 谈婷¹ 黎源鸿¹ 马昆鹏¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室 广州 510642;

2. 南方稻田作物多熟制现代化生产协同创新中心 长沙 410128)

摘要: 刚体六自由度是机械系统重要参数,其测量既可应用于运动学与动力学理论模型的验证,也可作为已知条件求解系统的约束反力等动力学分析。针对目前六自由度测量对仪器需求高、操作复杂的问题,提出一种基于常规测绘仪器全站仪实现的世界坐标系下刚体六自由度的测量方法,特点是通过全站仪测量分别设置在世界坐标系(World coordinate system, W 系)和刚体的体坐标系(Body coordinate system, B 系)一组已知控制点,即可实现刚体六自由度的测量,而且测量过程中全站仪无须置平操作。论文基于矩阵分析法分析了本全站仪免置平测量六自由度方法的原理,提出了数学模型并通过最小二乘法和奇异值分解相结合,实现模型的解算,在此基础上提出了本方法完整的应用步骤。利用SGT320E型三轴多功能转台与KTS460RM全站仪对本文方法进行了试验验证,并进行了相关误差分析。结果表明,全站仪免置平实现的刚体六自由度测量所得欧拉角精度(按 Z - Y - X 旋转顺序)分别为 2.738° 、 3.424° 、 2.344° ;刚体质心位置精度(按 X - Y - Z 顺序)分别为 0.006 m 、 0.013 m 、 0.009 m ,证明全站仪免置平测量方法理论和实践应用的可行性,可以满足多体机械系统中刚体六自由度的测量需求。

关键词: 六自由度测量; 全站仪; 免置平; 刚体; 世界坐标系

中图分类号: TH721

Rigid Body 6-DOF Measurement Method Realized by Total Station without Leveling

ZHAO Zuoxi^{1,2} SONG Junwen¹ TAN Ting¹ LI Yuanhong¹ MA Kunpeng¹

(1. Key Laboratory of Southern Agricultural Machinery and Equipment Key Technology Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642;

2. Collaborative Innovation Center for Multi-cropping Modern Production of Rice Field Crops in South China, Changsha 410128)

Abstract: The 6-DOF of rigid body is an important parameter of mechanical system. Its measurement can be applied to the verification of the theoretical model of kinematics and dynamics, and it can also be used as the dynamic analysis of the constraint reaction force of the known condition solving system. Aiming at the problem of high demand and complicated operation of the current 6-DOF measurement, a method for measuring the 6-DOF of the rigid body in the world coordinate system based on the total station instrument of the conventional surveying instrument is proposed, its characteristics are as follows: the six-degree-of-freedom measurement of rigid bodies can be achieved by total station's measuring a set of known control points in the world coordinate system (W coordinate system) and the body coordinate system (B coordinate system). and the total station does not need to be leveled during the measurement. Based on the matrix analysis method, the paper analyzes the principle of the 6-DOF method for the measurement of the total station, and proposes a mathematical model and combines the least squares method with the singular value decomposition to solve the model. Based on this, The complete application steps of this method. The SGT320E three-axis multi-function turntable and KTS460RM total station are used to verify the method, and related error analysis was carried out. The results show that the Euler angle accuracy (in the Z - Y - X rotation order) of the rigid body six-degree-of-freedom measurement by the total station is 2.73° , 3.424° , 2.344° , and the rigid body centroid position accuracy (in the X - Y - Z order) is 0.006 m , 0.013 m , 0.009 m , which proves the feasibility of the theoretical and practical application of the total station without leveling measurement method, and meet the measurement requirements of the 6-DOF of rigid body in multi-body mechanical systems.

* 国家重点研发计划(2016YFD0700101-02, 2017YFD0700400)和广东省教育厅省级重大科研(2016KZDZXM027)资助项目。20190122 收到初稿, 20191107 收到修改稿

Key words: 6-DOF measurement; total station; free leveling; rigid body; world coordinate system

0 前言

测量技术的发展水平及其在机械制造中的应用程度,已成为衡量制造科技水平的一个重要因素^[1]。机械系统往往可以视为刚体或刚体加柔性体通过不同连接件链接实现的多体系统,其中刚体的空间位置和空间姿态需要使用质心位置 3 个位置参数、刚体姿态对应 3 个角度参数来表示,刚体的六自由度的测量即是这 6 个参数的测量^[2]。刚体六自由度测量对机械系统的分析意义重大,可以用于机械系统运动学和动力学理论模型的验证手段,可以将物理点在刚体坐标系下坐标转换成为世界坐标系下的坐标,也可以将刚体六自由度测量结果作为已知条件代入运动学或动力学模型实现其它未知参数的求解^[3-5]。近年来很多国内外学者针对六自由度的测量技术进行了相关研究。

目前六自由度的测量都需要专门的测量仪器才能实施,常见的测量仪器主要包括惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)^[6]、单目^[7]或双目^[8]相机构成的视觉测量系统、激光干涉仪^[9]、全站仪^[10]、激光跟踪仪^[11]等。相机测量六自由度时对使用环境要求高,且价格昂贵;激光干涉仪对六自由度的测量需要结合专门设计的光路,并使用相关的探测器配合使用,在旋转方向测量范围较小。基于激光跟踪仪只能测量空间中的位置坐标,需要配合其他仪器使用才能实现六自由度的测量。全站仪又分为普通全站仪和智能型全站仪,现代全站仪往往需要配合计算机实时记录空间点的位置,且对测量距离有较大限制。普通全站仪价格低廉、测量精度高,但是其置平操作十分繁琐,且置平过程受外界因素影响较大^[12]。因此,需要探索一种更简便实用的全站仪测量六自由度测量的方法。

本文提出一种全站仪免置平以实现刚体六自由度测量方法,以满足机械领域对六自由度的测量需求。建立了全站仪免置平情况下,全站仪坐标系(Station coordinate system, S 系)、刚体坐标系(B 系)、世界坐标系(W 系)之间的坐标转换矩阵模型,通过最小二乘法求解刚体的 W 系下的六自由度参数,其中旋转矩阵的应用 SVD 方法严格保证其正交性。通过理论分析证明全站仪测量刚体六自由度的可行性,并采用三轴多功能转台对本方法进行试验验证。

本文涉及的符号命名方法简单说明如下。机械系统运动学和动力学分析涉及到不同坐标系及坐标

系之间的位置和角度关系(旋转矩阵 R 和平移矢量 T , 它们还有方向等区别)、点的名称及在不同坐标系下的分量,因而采用的符号及命名方法一般比较复杂。本文采用的符号定义如下。① 一般符号是字母后跟上下标表示,其中字母分为坐标系(W, B, S 之一)、点(P, Q 等)、坐标系间关系 (R, T); ② 右上标: 根据前面的字母有几种情况,如为矢量(点、坐标系间的平移矩阵 T)则为分解坐标系(表达坐标系,即为 W, B, S 之一),如为坐标系间的旋转矩阵 R 则表示目标坐标系; ③ 右下标: 前面字母为矢量 T (坐标系之间平移矩阵),则表示为“目标坐标系/参考坐标系”形式;字母为 R (坐标系之间旋转矩阵)时表示是哪一个坐标系旋转;字母为 P, Q 而右下标为数字时表示点的编号。

现举例说明如下,按照以上定义, $T_{B/W}^W$ 表示 B 系相对于 W 系的平移矢量,其元素是该矢量在 W 系下的分量; R_B^W 表示由 B 系到 W 系的旋转矩阵。 P^W 表示点 P 在 W 系下的分量组成的矢量。例外的情形, $P^W = (X^W, Y^W, Z^W)^T$ 表示法中为了减少使用的符号,括号中字母表示该点分量,由于意义清楚不至于造成理解困难。

1 刚体六自由度由坐标转换矩阵确定

自由的刚体有六个自由度,由于刚体中各质点间距离不变,为了确定刚体的六自由度,只需要确定刚体上不在一条直线上的任意三个质点的位置。三维空间体坐标系 B 相对世界坐标系 W 的运动变换共包含六个自由度,包括三个位置量信息和三个姿态量信息^[13]。三维位置信息采用 3×1 平移矢量 $T_{B/W}^W$ 可表示,三维姿态信息(三个欧拉角)可以用一个 3×3 阶的单位正交矩阵 R_B^W 来表示

$$R_B^W = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

矩阵 R_B^W 中的 9 个变量满足单位正交矩阵的 6 个约束,即如下关系式

$$\begin{cases} r_{11}r_{12} + r_{21}r_{23} + r_{31}r_{32} = 0 \\ r_{11}r_{13} + r_{21}r_{23} + r_{31}r_{33} = 0 \\ r_{12}r_{13} + r_{22}r_{23} + r_{32}r_{33} = 0 \\ r_{11}^2 + r_{21}^2 + r_{31}^2 = 1 \\ r_{12}^2 + r_{22}^2 + r_{32}^2 = 1 \\ r_{13}^2 + r_{23}^2 + r_{33}^2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

三维姿态可以通过依次绕不同坐标轴的 3 次连续转动的欧拉角来定义。若按 Z-Y-X 旋转顺序, 可依次命名为绕 Z 轴旋转角 Ψ , 绕 Y 轴旋转角 θ 和绕 X 轴旋转角 ϕ , 其表示如图 1 所示。

图 1 Z-Y-X 顺序旋转欧拉角示意图

根据 $\mathbf{R}_B^W$ 可以求出三个欧拉角 Ψ 、 θ 、 ϕ

$$\begin{cases} \psi = \arctan \frac{r_{21}}{r_{11}} \\ \theta = \arctan \frac{r_{31}}{\sqrt{1 - r_{31}^2}} \\ \phi = \arctan \frac{r_{32}}{r_{33}} \end{cases} \quad (3)$$

求解到三个欧拉角是刚体六自由度中的三个角度变量, 而 $\mathbf{T}_{B/W}^W$ 是六自由度中的三个平移量。这样求解刚体世界坐标系下的六自由度的问题就转化为求解刚体的体坐标系 B 与世界坐标系 W 的关系问题, 即确定 $\mathbf{T}_{B/W}^W$ 与 $\mathbf{R}_B^W$ 的问题。设体坐标系上任意控制点 P 坐标为 $P^B = (X^B, Y^B, Z^B)^T$, 全局坐标为 $P^W = (X^W, Y^W, Z^W)^T$, 转换关系为

$$P^W = \mathbf{R}_B^W P^B + \mathbf{T}_{B/W}^W = (\mathbf{R}_B^W)^T P^B + \mathbf{T}_{B/W}^W \quad (4)$$

2 世界坐标系下全站仪免置平刚体六自由度测量原理

2.1 全站仪免置平测量点三维位置的模型

如图 2 所示, 为 KTS460RM 系列的全站仪, 传统情况下使用全站仪都是基于精密调平, 置平精度很大程度上依赖于操作者的经验和技能。普通全站仪免置平测量方法的操作简单且能保证精度, 目前已经有不少相关的研究与应用^[14-17]。本文采用全站仪免置平测量方法, 初始测量时没有调平操作, 这样初始测量时全站仪坐标系(零位)的 Z^S 轴没有与水平面垂直, X 或 Y 轴也不一定与特定参照物对齐。

这体现在全站仪坐标系 S 的零位和世界坐标系 W 之间的没有进行初始对准操作, 定义这二者之间关系为 $\mathbf{T}_{S/W}^W$ 与 $\mathbf{R}_S^W$, 由于没有初始置平操作, 这两个变量需要通过控制点的标定来确定。

图 2 KTS460RM 系列全站仪与坐标系示意图

如图 2 所示, 建立坐标系 $O^1 X^1 Y^1 Z^1$ 与底座固定, 坐标原点 O^1 位于底座中心处, Y^1 轴与水平零位(测量开始时外框对称平面与底座的交线)重合, Z^1 轴过全站仪光心竖直向上。将该坐标系原点沿 Z^1 轴平移到全站仪光心 O^S 处, 得到全站仪坐标系 $O^S X^S Y^S Z^S$, 任意控制点 P 的全站仪坐标为 $P^S = (X^S, Y^S, Z^S)^T$ 。过光心 O^S 建立与全站仪外框固定的坐标系 $O^S X^2 Y^2 Z^2$ 、与内框固定的坐标系 $O^S X^3 Y^3 Z^3$, 则可清晰表示出全站仪在测量点位置过程中的外框转角 α 以及内框转角 β , s 指光心到控制点的距离。

根据图 2 可推导出全站仪坐标与 α 、 β 、 s 之间的关系式如下

$$P^S = \begin{pmatrix} X^S \\ Y^S \\ Z^S \end{pmatrix} = f(\alpha, \beta, s) = \begin{pmatrix} s \sin \alpha \sin \beta \\ s \cos \alpha \sin \beta \\ s \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)中右侧的角度 α 、 β 和距离 s 是相对于初始测量零位的, 因而测得的 P^S 是相对于该零位的。本方法中没有初始置平操作, 因而对同样的物理点测量的结果会因为初始零位的不同而不同。

2.2 全站仪免置平测量刚体六自由度的原理

由式(4)可知, 要测量世界坐标系下刚体六自由度, 就需要知道刚体体坐标系 B 与世界坐标系 W 之间的 $\mathbf{T}_{B/W}^W$ 与 $\mathbf{R}_B^W$ 。如图 3 所示, 世界坐标系(W 系), 刚体的体坐标系(B 系)上各有一组控制点, 且这两组控制点分别至少有 4 个不共面, 分别记为 Q_i 与 P_i , i 为点的编号。为了求得 $\mathbf{R}_B^W$ 与 $\mathbf{T}_{B/W}^W$, 考虑旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 与平移矢量 $\mathbf{T}$ 之间的基本关系^[18], 则有

$$\mathbf{R}_B^W = \mathbf{R}_B^S \mathbf{R}_S^W \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_{B/W}^W = \mathbf{T}_{B/S}^W + \mathbf{T}_{S/W}^W = \mathbf{T}_{B/S}^W - \mathbf{T}_{W/S}^W =$$

$$\mathbf{R}_S^W (\mathbf{T}_{B/S}^S - \mathbf{T}_{W/S}^S) = (\mathbf{R}_S^W)^T (\mathbf{T}_{B/S}^S - \mathbf{T}_{W/S}^S) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,为了求得 $\mathbf{R}_B^W$ 与 $\mathbf{T}_{B/W}^W$ 需要坐标系 B 、 S 之间的关系 $\mathbf{R}_B^S$ 、 $\mathbf{T}_{B/S}^S$,坐标系 S 、 W 之间的关系 $\mathbf{R}_S^W$ 与 $\mathbf{T}_{W/S}^S$ 。为此采用已知控制点(控制点在两个坐标系下的三维坐标已知)来实现求解,即实现两个坐标系之间外部参数标定

$$\mathbf{Q}_i^S = \mathbf{R}_S^W \mathbf{Q}_i^W + \mathbf{T}_{W/S}^S \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_i^S = \mathbf{R}_B^S \mathbf{P}_i^B + \mathbf{T}_{B/S}^S \quad (9)$$

由式(8)和式(9)知,两组控制点 $\mathbf{Q}_i$ 和 $\mathbf{P}_i$ 在两个坐标系下的位置即 $\mathbf{Q}_i^S$ 、 $\mathbf{Q}_i^W$ 与 $\mathbf{P}_i^S$ 、 $\mathbf{P}_i^B$ 需要先行确定即可。

由式(6)可见 S 系所在空间位置改变不影响 $\mathbf{R}_B^W$,由式(7)可知 S 系所在空间位置改变不影响 $\mathbf{T}_{B/W}^W$,于是求得的刚体六自由度不受免置平测量的影响,这也是免置平测量的理论依据。

图3 刚体控制点全局坐标间接测量原理图

2.3 基于已知控制点的坐标转换矩阵的标定算法

将式(9)中的 $\mathbf{R}_B^S$ 写成 $r_{11} \sim r_{33}$ 共9个变量(与式(1)中的 r 不同), $\mathbf{T}_{B/S}^S$ 记为 $(T_X, T_Y, T_Z)^T$ 共3个变量,可以构成包含12个元素的列矢量作为待求解的状态变量矢量,记为 $\mathbf{x}$,即

$$\mathbf{x} = (r_{11}, r_{12}, r_{13}, \dots, r_{33}, T_X, T_Y, T_Z)^T \quad (10)$$

将控制点分别记为 $\mathbf{P}_i^B = (X_i^B, Y_i^B, Z_i^B)^T$ 和 $\mathbf{P}_i^S = (X_i^S, Y_i^S, Z_i^S)^T$,则按照式(9)对每一个控制点 $\mathbf{P}_i$ 可以写出以下形式的矩阵表达式

$$\begin{pmatrix} X_i^S \\ Y_i^S \\ Z_i^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_i^B & Y_i^B & Z_i^B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_i^B & Y_i^B & Z_i^B & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_i^B & Y_i^B & Z_i^B & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{x} \quad (11)$$

于是控制点 $\mathbf{P}_i$ 共有 n 个时可以构造如下的 $3n \times 12$ 的矩阵 $\mathbf{A}$ 及 $3n \times 1$ 的列矢量 $\mathbf{b}$ 如下

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} X_1^B & Y_1^B & Z_1^B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_1^B & Y_1^B & Z_1^B & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_1^B & Y_1^B & Z_1^B & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^B & Y_n^B & Z_n^B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_n^B & Y_n^B & Z_n^B & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_n^B & Y_n^B & Z_n^B & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{b} = (X_1^S, Y_1^S, Z_1^S, \dots, X_n^S, Y_n^S, Z_n^S)^T \quad (13)$$

则可以得到非齐次线性方程组求解问题

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (14)$$

$\mathbf{x}$ 包含12个未知参数,则通过至少4个匹配控制点确定12个方程求解12个未知参数,这4个控制点不能共面。实际情况下控制点 $\mathbf{P}_i$ 个数往往大于4个,这样上式(14)求解变成线性最小二乘法求最优解的问题,使用线性最小二乘法^[19]可以求解得到 $\mathbf{x}$ 的最佳估计量 $\hat{\mathbf{x}}$ 为

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (15)$$

这样可以求出式(9)中的 $\mathbf{R}_B^S$ 与 $\mathbf{T}_{B/S}^S$ 。使用线性最小二乘法求解得到的坐标系旋转矩阵为 $\hat{\mathbf{R}}$,此时的 $\hat{\mathbf{R}}$ 并不能保证其正交性,令 $\hat{\mathbf{R}}\hat{\mathbf{R}}^T = \mathbf{I}$,为了确保 $\hat{\mathbf{R}}$ 正交,引入奇异值分解(Singular value decomposition, SVD)法^[20]:假定 $\hat{\mathbf{R}}$ 的奇异值分解为 $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T$,由于 3×3 正交矩阵的三个奇异值都是1,我们可以简单地用 3×3 单位矩阵 $\mathbf{I}$ 替换 $\mathbf{D}$,这样得到的矩阵 $\mathbf{U}\mathbf{I}\mathbf{V}^T$ 就满足完全正交,因此利用SVD法可以得到正交的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 。

3 全站仪免置平世界坐标系下刚体六自由度测量方法

依据章节2.2中全站仪免置平刚体六自由度测量原理分析过程即可得到本文的全站仪免置平世界坐标系下的刚体六自由度参数测量具体方法,方法流程图如图4所示。

从图4可知,整个方法流程可以分为13个步骤进行。步骤①确定 W 系和被测刚体:根据实际测量需要将 W 系定在合适的位置,并选定被测刚体;步骤②在刚体上建立 B 系:在所选定的被测刚体上建立 B 系,通常是将 B 系原点设置在刚体质心处, B 系与刚体固定,随刚体运动而运动。

图4 全站仪测量六自由度基本方法流程图

步骤③架设全站仪, 建立 S 系: 根据测量需要在距离刚体合适位置架设全站仪, 全站仪免置平放置, 根据 2.1 节原理确定全站仪坐标系 S 系; 步骤④在 B 系确定至少 4 个不共面的控制点 P_i : 在刚体上 B 系下确定并标记 n ($n \geq 4$) 个控制点 P_i , n 个控制点中至少有 4 个不共面; 步骤⑤在 W 系确定至少 4 个不共面的控制点 Q_i : 在 W 系确定并标记 n ($n \geq 4$) 个控制点 Q_i , n 个控制点中至少有 4 个不共面; 步骤⑥人工测定 P_i^B 和 Q_i^W : 通过刻度尺或其他简易工具可以测量得到控制点 P_i 的局部坐标 P_i^B (显然, 在刚体运动过程中, P_i^B 始终保持不变) 以及控制点 Q_i 的局部坐标 Q_i^W ; 步骤⑦全站仪免置平测量 P_i^S 和 Q_i^S : 通过步骤③中架设好的全站仪, 免置平测量控制点 P_i 和 Q_i 的三个参数 α 、 β 、 s , 并根据式(5)转化为全站仪坐标 P_i^S 和 Q_i^S ; 步骤⑧根据 P_i^S 和 P_i^B , 结合式(9)求解 R_B^S 、 $T_{B/S}^S$: 将求解得到的控制点 P_i 的全站仪坐标 P_i^S 和步骤⑥中得到的 P_i^B , 代入式(9)并采用 2.3 节中的矩阵算法, 可以求解得到 R_B^S 和 $T_{B/S}^S$; 步骤⑨根据 Q_i^S 、 Q_i^W , 结合式(8)求解 R_W^S 、 $T_{W/S}^S$: 将步骤⑥中得到的 Q_i^W 以及步骤⑦中的 Q_i^S , 代入式(8)并采用第 2.3 节中的矩阵算法, 可以求解得到 R_W^S 和 $T_{W/S}^S$; 步骤⑩根据 R_B^S 和 R_W^S , 结合式(6)求解 R_B^W : 根据步骤⑧中所得求解得到 R_B^S 以及步骤⑨所得 R_W^S , 代入式(6)中即可求得 R_B^W ; 步骤⑪根

据 R_W^S 、 $T_{B/S}^S$ 、 $T_{W/S}^S$, 结合式(7)求解 $T_{B/W}^W$: 根据步骤⑨所得 R_W^S 和 $T_{W/S}^S$ 、步骤⑧中所得 $T_{B/S}^S$, 代入式(7)即可求得 $T_{B/W}^W$; 步骤⑫根据 R_B^W , 结合式(3)求解三个欧拉角: 根据步骤⑪中求得的 R_B^W , 结合式(3)可以求解得到刚体六自由度中的三个欧拉角 ψ 、 θ 、 ϕ ; 步骤⑬根据 $T_{B/W}^W$ 得到三个平移量: 根据式(4)可知, 显然 $T_{B/W}^W$ 就是刚体六自由度中的三个平移量。

4 试验验证

4.1 材料与方法

本文使用三轴转台作为试验平台, 仅使用外轴和中轴, 将其视为二轴转台使用, 转台的外轴和中轴分别作为两个被测刚体。图 5 所示是华南农业大学的仿真测试设备 SGT320E 型三轴多功能转台试验现场, 采用 KTS460RM 型全站仪进行测量, 其中转台角位置定位精度达到 $\pm 0.001^\circ$, 全站仪测角精度为 $\pm 0.003^\circ$, 因此可以将转台值作为真实值, 全站仪作为测量值进行对比。对于转台上的控制点使用宝马标记纸进行标记, 在外轴上和中轴(此时内轴锁紧和中轴视为一体)上设置 10 个控制点, 分别记为 P_i 、 P_i' , ($n=1, 2, \dots, 10$)。

图5 SGT320E 型三轴多功能转台实体图

在转台上建立世界坐标系和体坐标系, 如图 6 所示, 初始姿态世界坐标系 W 坐标原点设置在转台中心处, X^W 轴与外轴轴线重合, Z^W 轴与中轴轴线重合, 利用右手定则确定 Y^W 轴, 两个体坐标系 $X^{out}Y^{out}Z^{out}$ 、 $X^{in}Y^{in}Z^{in}$ 分别与外轴和中轴固定, 初始姿态世界坐标系与两个体坐标系是重合的, 在之后转台的运动过程中 W 系与两个体坐标系始终原点重合, 但是 W 系不随刚体转动。转台台体采用 U-O-O 结构, 即 U 型外框绕 Z^W 轴旋转, O 型中框绕俯仰 X^W 轴旋转, O 型内框绕横滚 Y^W 轴旋转, 外轴和中轴均可连续无限旋转。本次试验转台采用位置模式进行全站仪六自由度测量试验。启动转台电控系统,

使得转台初始姿态分别为中轴 -90° ，外轴 135° ；其中位置模式中转台的“位率”采用 $0(^{\circ})/s$ ；“位加速度”采用 $10(^{\circ})/s^2$ 。

图 6 转台坐标系示意图

4.2 试验步骤

在适当的位置架设全站仪，全站仪距离转台 3 m 左右，保证全站仪激光能打到所有布置于转台的控制点上，在测量转台多组姿态中，全站仪位置始终保持不变。三轴转台分别转到三组姿态进行试验，三组姿态相对于转台初始姿态的外轴转过角度为 λ_1 ，内轴转过角度为 λ_2 （由于内轴锁紧，则 λ_2 始终为 0° ），中轴转过角度为 λ_3 ，姿态 1： $\lambda_1=20^\circ$ ， $\lambda_2=0^\circ$ ， $\lambda_3=30^\circ$ ，姿态 2： $\lambda_1=-10^\circ$ ， $\lambda_2=0^\circ$ ， $\lambda_3=40^\circ$ ，姿态 3： $\lambda_1=-25^\circ$ ， $\lambda_2=0^\circ$ ， $\lambda_3=15^\circ$ 。则转台外轴对应三个欧拉角 ψ 、 θ 、 ϕ 真实值如下，姿态 1： 20° 、 0° 、 0° ，姿态 2： -10° 、 0° 、 0° ，姿态 3： -25° 、 0° 、 0° ；转台中轴对应三个欧拉角 ψ 、 θ 、 ϕ 真实值如下，姿态 1： 20° 、 0° 、 30° ，姿态 2： -10° 、 0° 、 40° ，姿态 3： -25° 、 0° 、 15° 。三组姿态下转台外轴和中轴对应三个平移量真实值均为 0、0、0，单位：m。

转台由初始姿态转台三组姿态过程中，初始姿态所测 P_i^W 和 $P_i^{W'}$ 与姿态 1、2、3 中的 P_i^B 和 $P_i^{B'}$ 相同（在转台转动过程中，控制点的局部坐标始终保持不变），初始姿态所测即等价于图 4 中的 Q_i^W ， $P_i^{W'}$ 同理。因此，利用图 4 所示全站仪测量六自由度方法流程即可求得全站仪免置平测量转台外轴和中轴这两个刚体在三组姿态下的六自由度参数，并将测得结果与转台真实值进行比较。

4.3 试验结果

试验得到的最终计算结果如表 1、2 所示。表 1 表示外轴（刚体 1）三组姿态下的测量结果，表 2 表示中轴（刚体 2）三组姿态下的测量结果。试验结果表明：全站仪免置平测量方法能够实现六自由度参数的高精度测量，全站仪免置平实现的刚体六自由度测量所得欧拉角精度（按 Z-Y-X 旋转顺序）分别为 2.738° 、 3.424° 、 2.344° ；刚体质心位置

精度（按 X-Y-Z 顺序）分别为 0.006 m、0.013 m、0.009 m。

4.4 误差分析

由于本文中 KTS460RM 系列全站仪对控制点的测量距离为 3 m 左右，因此全站仪测距精度为 ± 0.010 m，综合考虑图 4 步骤⑥中人工测定测量导致的坐标测量误差为 ± 0.010 m，本文方法对于刚体质心位置精度基本符合要求；由于转台角位置定位精度达到 $\pm 0.001^\circ$ ，全站仪测角精度为 $\pm 0.003^\circ$ ，本文方法对于刚体六自由度测量所得欧拉角误差偏大，但是考虑角度误差传递^[21]模型，可以判定欧拉角误差基本满足测量要求。在全站仪免棱镜免置平测量方式中，误差来源还包括测距误差和瞄准误差^[22]。瞄准误差主要是人眼在判断全站仪打在被测刚体上的激光光斑中心是否与刚体上控制点中心重合时的误差^[10]。KTS460RM 系列全站仪激光光斑为 $0.007\text{ m} \times 0.0014\text{ m}$ ，光斑大小以及在瞄准点的过程中人为的误差，也会对最终六自由度参数的测量结果产生影响。测距误差是指全站仪对控制点距离测量产生的误差，包括设备固有误差和与控制点分布情况产生的误差，当控制点所在平面与测距激光束夹角很小，全站仪接收的反射光太弱就会大大降低测距精度。在摆放全站仪和在被测刚体上控制点的分布时要保证测距激光束与平面夹角尽可能大。

5 结论

在六自由度解算原理基础上，提出了全站仪免置平测量刚体六自由度的理论模型与方法流程，在保证精度的情况下大大降低了人力物力的消耗，免去了全站仪置平操作的繁琐流程。用线性最小二乘结合 SVD 方法实现全站仪坐标系、世界坐标系、体坐标系之间坐标转换矩阵的解算。使用三轴转台的外轴和中轴作为被测刚体，进行了全站仪免置平测量刚体六自由度方法的验证试验。试验结果表明，全站仪免置平实现的刚体六自由度测量所得欧拉角精度（按 Z-Y-X 旋转顺序）分别为 2.738° 、 3.424° 、 2.344° ；刚体质心位置精度（按 X-Y-Z 顺序）分别为 0.006 m、0.013 m、0.009 m，该结果基本满足刚体六自由度参数测量精度要求。课题组将进一步研究控制点的分布紧密程度对测量结果的影响、完善误差传递模型，以提高全站仪免置平实现的世界坐标系下的刚体六自由度测量精度。

表 1 外轴(刚体 1)三组姿态下的测量结果

姿态	待求参数	三轴转台设定的真值	本方法计算值	误差	中间计算结果
1	R_B^W	$\begin{pmatrix} 0.940 & -0.342 & 0.000 \\ 0.342 & 0.940 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.946 & -0.324 & 0.026 \\ 0.324 & 0.946 & 0.000 \\ -0.024 & 0.009 & 1.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.006 & 0.018 & 0.026 \\ -0.018 & 0.006 & 0.000 \\ -0.024 & 0.009 & 0.000 \end{pmatrix}$	R_B^S $\begin{pmatrix} 0.932 & -0.353 & 0.090 \\ 0.361 & 0.927 & -0.099 \\ -0.048 & 0.125 & 0.991 \end{pmatrix}$
	$T_{B/W}^W$	(0.000 0.000 0.000)	(0.006 -0.013 0.001)	(0.006 -0.013 0.001)	$T_{B/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
	质心/m	(0.000 0.000 0.000)	(0.006 -0.013 0.001)	(0.006 -0.013 0.001)	R_S^W $\begin{pmatrix} 0.999 & 0.039 & -0.024 \\ -0.036 & 0.993 & 0.115 \\ 0.029 & -0.114 & 0.993 \end{pmatrix}$
	欧拉角/(°)	(20.000 0.000 0.000)	(18.890 1.402 0.492)	(-1.110 1.402 0.492)	$T_{W/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
2	R_B^W	$\begin{pmatrix} 0.985 & 0.174 & 0.000 \\ -0.174 & 0.985 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.987 & 0.158 & -0.008 \\ -0.158 & 0.987 & 0.006 \\ 0.009 & -0.005 & 1.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.003 & -0.015 & -0.008 \\ 0.015 & 0.003 & 0.006 \\ 0.009 & -0.005 & 0.000 \end{pmatrix}$	R_B^S $\begin{pmatrix} 0.992 & 0.120 & 0.002 \\ -0.119 & 0.986 & -0.111 \\ -0.016 & 0.110 & 0.994 \end{pmatrix}$
	$T_{B/W}^W$	(0.000 0.000 0.000)	(0.000 0.006 -0.002)	(0.000 0.006 -0.002)	$T_{B/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
	质心/m	(0.000 0.000 0.000)	(0.000 0.006 -0.002)	(0.000 0.006 -0.002)	R_S^W $\begin{pmatrix} 0.999 & 0.039 & -0.024 \\ -0.036 & 0.993 & 0.115 \\ 0.029 & -0.114 & 0.993 \end{pmatrix}$
	欧拉角/(°)	(-10.000 0.000 0.000)	(-9.111 -0.501 -0.261)	(0.889 -0.501 -0.261)	$T_{W/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
3	R_B^W	$\begin{pmatrix} 0.906 & 0.423 & 0.000 \\ -0.423 & 0.906 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.909 & 0.417 & -0.022 \\ -0.417 & 0.909 & -0.005 \\ 0.017 & 0.014 & 1.000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.003 & -0.006 & -0.022 \\ 0.006 & 0.003 & -0.005 \\ 0.017 & 0.014 & 0.000 \end{pmatrix}$	R_B^S $\begin{pmatrix} 0.925 & 0.389 & -0.044 \\ -0.381 & 0.917 & -0.120 \\ -0.007 & 0.128 & 0.992 \end{pmatrix}$
	$T_{B/W}^W$	(0.000 0.000 0.000)	(0.003 -0.003 -0.001)	(0.003 -0.003 -0.001)	$T_{B/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
	质心/m	(0.000 0.000 0.000)	(0.003 -0.003 -0.001)	(0.003 -0.003 -0.001)	R_S^W $\begin{pmatrix} 0.999 & 0.039 & -0.024 \\ -0.036 & 0.993 & 0.115 \\ 0.029 & -0.114 & 0.993 \end{pmatrix}$
	欧拉角/(°)	(-25.000 0.000 0.000)	(-24.637 -1.002 0.797)	(0.363 -1.002 0.797)	$T_{W/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)

表 2 中轴(刚体 2)三组姿态下的测量结果

姿态	待求参数	三轴转台设定的真值	本方法计算值	误差	中间计算结果
1	R_B^W	$\begin{pmatrix} 0.940 & -0.296 & 0.171 \\ 0.342 & 0.814 & -0.470 \\ 0.000 & 0.500 & 0.866 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.949 & -0.242 & 0.202 \\ 0.309 & 0.837 & -0.452 \\ -0.060 & 0.492 & 0.869 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.009 & 0.054 & 0.031 \\ -0.033 & 0.023 & 0.018 \\ -0.060 & -0.008 & 0.003 \end{pmatrix}$	R_B^S $\begin{pmatrix} 0.934 & -0.251 & 0.255 \\ 0.353 & 0.768 & -0.536 \\ -0.062 & 0.590 & 0.805 \end{pmatrix}$
	$T_{B/W}^W$	(0.000 0.000 0.000)	(0.002 -0.006 0.003)	(0.002 -0.006 0.003)	$T_{B/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
	质心/m	(0.000 0.000 0.000)	(0.002 -0.006 0.003)	(0.002 -0.006 0.003)	R_S^W $\begin{pmatrix} 0.999 & 0.039 & -0.024 \\ -0.036 & 0.993 & 0.115 \\ 0.029 & -0.114 & 0.993 \end{pmatrix}$
	欧拉角/(°)	(20.000 0.000 30.000)	(18.055 3.424 29.498)	(-1.945 3.424 -0.502)	$T_{W/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
2	R_B^W	$\begin{pmatrix} 0.985 & 0.133 & -0.112 \\ -0.174 & 0.754 & -0.633 \\ 0.000 & 0.643 & 0.766 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.987 & 0.116 & -0.114 \\ -0.161 & 0.776 & -0.610 \\ 0.018 & 0.620 & 0.784 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.002 & -0.017 & -0.002 \\ 0.013 & 0.021 & 0.023 \\ 0.018 & -0.023 & 0.018 \end{pmatrix}$	R_B^S $\begin{pmatrix} 0.993 & 0.067 & -0.099 \\ -0.115 & 0.706 & -0.699 \\ 0.023 & 0.705 & 0.709 \end{pmatrix}$
	$T_{B/W}^W$	(0.000 0.000 0.000)	(0.000 -0.006 -0.007)	(0.000 -0.006 -0.007)	$T_{B/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
	质心/m	(0.000 0.000 0.000)	(0.000 -0.006 -0.007)	(0.000 -0.006 -0.007)	R_S^W $\begin{pmatrix} 0.999 & 0.039 & -0.024 \\ -0.036 & 0.993 & 0.115 \\ 0.029 & -0.114 & 0.993 \end{pmatrix}$
	欧拉角/(°)	(-10.000 0.000 40.000)	(-9.279 -1.001 38.343)	(0.721 -1.001 -1.657)	$T_{W/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
3	R_B^W	$\begin{pmatrix} 0.906 & 0.408 & -0.109 \\ -0.423 & 0.876 & -0.235 \\ 0.000 & 0.259 & 0.966 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.925 & 0.361 & -0.123 \\ -0.378 & 0.907 & -0.187 \\ 0.044 & 0.219 & 0.975 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.018 & -0.047 & -0.013 \\ 0.044 & 0.031 & 0.048 \\ 0.044 & -0.040 & 0.009 \end{pmatrix}$	R_B^S $\begin{pmatrix} 0.941 & 0.311 & -0.137 \\ -0.338 & 0.892 & -0.300 \\ -0.028 & 0.328 & 0.945 \end{pmatrix}$
	$T_{B/W}^W$	(0.000 0.000 0.000)	(-0.006 -0.011 -0.009)	(-0.006 -0.011 -0.009)	$T_{B/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)
	质心/m	(0.000 0.000 0.000)	(-0.006 -0.011 -0.009)	(-0.006 -0.011 -0.009)	R_S^W $\begin{pmatrix} 0.999 & 0.039 & -0.024 \\ -0.036 & 0.993 & 0.115 \\ 0.029 & -0.114 & 0.993 \end{pmatrix}$
	欧拉角/(°)	(-25.000 0.000 15.000)	(-22.262 -2.509 12.656)	(2.738 -2.509 -2.344)	$T_{W/S}^W$ (0.227 2.713 -0.377)

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 Zurong, SHI Zhaoyao, LI Yan. Research on the development of measurement technology in the field of mechanical manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 1-11.
- [2] 郭盛, 孙振瑶, 曲海波. 基于支链构造法的新型 6-DOF 并联机构构型设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 35-42.
GUO Sheng, SUN Zhenyao, QU Haibo. Configuration design of a new 6-DOF parallel mechanism based on branch chain construction method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 35-42.
- [3] 苑飞虎, 赵铁石, 刘晓, 等. 一种六输入三自由度并联平台机构分析[J]. 机器人, 2013, 35(4): 456-461.
YUAN Feihu, ZHAO Tieshi, LIU Xiao, et al. A six-input three-degree-of-freedom parallel platform mechanism analysis[J]. Robots, 2013, 35(4): 456-461.
- [4] FU Jianxun, GAO Feng. Optimal design of a 3-Leg 6-DOF parallel manipulator for a specific workspace[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(4): 659-668.
- [5] 成荣, 胡金春, 杜胜武, 等. 基于矩形永磁体磁场信息的 6 自由度微位移精密测量[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 141-147.
CHENG Rong, HU Jinchun, DU Shengwu, et al. Second-degree-of-freedom micro-displacement precision measurement based on magnetic information of rectangular permanent magnets[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 141-147.
- [6] 姚二亮, 张合新, 张国良, 等. 基于 Vision-IMU 的机器人同时定位与地图创建算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 230-238.
YAO Erliang, ZHANG Hexin, ZHANG Guoliang, et al. Simultaneous positioning and map creation algorithm for robot based on Vision-IMU[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 230-238.
- [7] ABDULLAH A H, RIBY A B, et al. A geometric approach for kinematic identification of an industrial robot using a monocular camera[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 57: 329-346.
- [8] 梁经伦, 邝泳聪, 冼志军, 等. 基于视觉测量的 XY-Theta 并联平台分步运动学标定[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 1-9.
LIANG Jinglun, PEI Yongcong, ZHAI Zhijun, et al. Step-by-step kinematics calibration of XY-Theta parallel platform based on visual measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 1-9.
- [9] LIU C H, JYWE W Y, HSU C C, et al. Development of a laser-based high-precision six-degrees-of-freedom motion errors measuring system for linear stage[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(5): 055110.
- [10] 吴斌, 张雨, 王占胜, 等. 非正交轴系激光全站仪坐标测量技术[J]. 天津大学学报, 2018, 51(11): 1188-1194.
WU Bin, ZHANG Yu, WANG Zhansheng, et al. Coordinate measurement technology of non-orthogonal shaft laser total station[J]. Journal of Tianjin University, 2018, 51(11): 1188-1194.
- [11] 史晓佳, 张福民, 曲兴华, 等. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 1-7.
SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. Pose measurement and online error compensation of KUKA industrial robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 1-7.
- [12] GHILANI C D, WOLF P. Elementary surveying[M]. London: Pearson Education, 2015.
- [13] MOON F C. Applied dynamics, with applications to multibody and mechatronic systems[J]. Physics Textbook, 2008, 61(1): 104-105.
- [14] 吴维军, 朱洪涛, 曹娟华等. 车载全站仪位姿估计方法研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 51-56.
WU Weijun, ZHU Hongtao, CAO Juanhua, et al. Research on pose estimation method of vehicle total station[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(12): 51-56.
- [15] 顾玄龙, 刘成龙, 郭伟. 现代智能型全站仪不整平不对中测量的可行性分析[J]. 测绘通报, 2018(10): 79-83, 92.
GU Xuanlong, LIU Chenglong, GUO Wei. Feasibility analysis of modern intelligent total station not flattening misalignment measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(10): 79-83, 92.
- [16] 郭伟. 智能型全站仪不整平测量技术研究及其应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
GUO Wei. Research and application of intelligent total station non-leveling measurement technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [17] 徐宜敏. 全站仪免置平测量技术及其算法模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
XU Yimin. Research on the total station free measurement technology and its algorithm model [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.
- [18] BAUCHAU O A. Flexible multibody dynamics[J]. Solid Mechanics & Its Applications, 2011, 176(4): 543-564.
- [19] SEARLE S R. Matrix algebra useful for statistics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1985.

- [20] 王建国, 李健, 万旭东. 基于奇异值分解和局域均值分解的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 104-110.

WANG Jianguo, LI Jian, WAN Xudong. Fault feature extraction method for rolling bearings based on singular value decomposition and local mean decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 104-110.

- [21] 霍炬, 李云辉, 杨明. 激光投影成像式运动目标位姿测量与误差分析[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 127-131.

HUO Ju, LI Yunhui, YANG Ming. Measurement and error analysis of laser projection imaging moving targets[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 127-131.

- [22] WU Bin, WANG Bing. Automatic measurement in

large-scale space with the laser theodolite and vision guiding technology[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013(5): 533-542.

作者简介: 赵祚喜(通信作者), 男, 1968 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能农机装备系统设计。

E-mail: zhao_zuoxi@hotmail.com

宋俊文, 女, 1994 年出生。主要研究方向为车辆设计理论与方法。

E-mail: 710512700@qq.com

谈婷, 女, 1995 年出生。主要研究方向为车辆设计理论与方法。

E-mail: 2243517403@qq.com

黎源鸿, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为土壤异质硬物检测。

E-mail: 625267029@qq.com

马昆鹏, 男, 1992 年出生。主要研究方向为土壤异质硬物检测。

E-mail: mkp1002040223@gmail.com

(上接第 27 页)

Mechanics, 2014, 141(3): 04014134.

- [12] KARANDIKAR J M, KIM N H, SCHMITZ T L. Prediction of remaining useful life for fatigue-damaged structures using Bayesian inference[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 96(2): 588-605.

- [13] ZHU B, DAN M F. Reliability assessment of ship structures using Bayesian updating[J]. Engineering Structures, 2013, 56(6): 1836-1847.

- [14] PENG W, HUANG H Z, LI Y, et al. Life cycle reliability assessment of new products: A Bayesian model updating approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 112: 109-119.

- [15] MOSALLAM A, MEDJAHHER K, ZERHOUNI N. Data-driven prognostic method based on Bayesian approaches for direct remaining useful life prediction[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27(5): 1037-1048.

作者简介: 朱林(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机械系统可靠性与寿命预测。

E-mail: zhulin157@163.com

贾民平, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为故障诊断及质量监控。

E-mail: mpjia@seu.edu.cn