

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.02.003

双光斑重叠式 PSD 空间点位测量系统研究*

孙玉玺, 陆永华*

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对空间点位测量的问题,设计了一种新型双光斑重叠式 PSD 空间点位测量系统。构建了测量系统的测量平台和运动控制平台,并将光电位敏传感器 PSD 作为测量系统测头上的靶标,形成了空间测量三角形,采用逐次逼近算法,使两个光斑在 PSD 上轮流交替跟踪,实现了测量系统的自动跟踪,并利用 PSD 对于光斑重心采集的原理,判断两光斑重合情况,进行了空间点位信息的采集测量。以某型航空发动机 8 级涡轮转子叶片为测量对象,用三坐标测量机和本测量系统分别对其进行了测量对比试验。研究结果表明,测量系统对距离测量系统 1.5 m 远处,对目标点的测量偏差为亚 mm 级,正向偏差维持在 0.4 mm 以内,负向偏差维持在 -0.25 mm 以内。

关键词: 双光斑; 重叠式; PSD; 空间点位

中图分类号: TH74; TP272 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)02-0145-05

Spatial coordinates measurement system based on double spots overlapped PSD

SUN Yu-xi, LU Yong-hua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at spatial coordinates measurement, a new spatial coordinates measurement system based on the double spots overlapped PSD was designed. The measurement and control platform of the spatial coordinate measurement system was constructed and photoelectric sensor PSD was taken as the target on the measurement head to form the measuring triangle. A successive approximation algorithm to make double spots alternately tracking on the PSD and realize the automatic tracking of the measurement system was used. The principle of PSD acquisition spot center of gravity and judging double spots overlap was used by the measurement system to measure the information of spatial coordinates. An 8th level turbine rotor blade of a certain type aircraft engine was taken as measuring object of the measurement system. The results indicate that measured by three coordinate measurement machine and by our measurement system, the deviation of our measurement system for target is at sub-millimeter level, and maintains at the range of +0.4 mm~-0.25 mm when the distance varies in 1.5 m from the measurement system.

Key words: double spots; overlapped; PSD; spatial coordinates

0 引言

近年来,空间点位激光测量技术得到了广泛的研究与应用^[1],它以测量范围大、柔性、动态、高精度等特点在大尺寸物体高精度测量中发挥着重要作用^[2]。目

前,比较常用的空间点位测量方法有球坐标法、三角法、多边形法。球坐标法典型的应用是激光跟踪仪,它主要应用激光干涉仪进行测长,国外方面的技术已非常成熟,目前,美国 API 公司、Faro 公司、瑞士 Leica 公司均有相应的产品在市场销售^[3],国内方面,天津大学、清华大学等一些国内高校也对此做了长期、深入

收稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005122);南京航空航天大学科研业务费青年科技创新基金资助项目(56XAA13043)

作者简介: 孙玉玺(1988-),男,山东青岛人,主要从事测控系统方面的研究。E-mail:yuxisun0425@163.com

通信联系人: 陆永华,男,博士,副教授。E-mail:nuaa_lyh@nuaa.edu.cn

地研究。三角法测量方法,英国的J.R.Mayer等人基于三角法建立了激光跟踪测量系统,三角法的典型应用是双经纬仪系统,它主要是利用完全相同的两台经纬仪通过对点的方式进行空间点位测量^[4],由于采用纯角度量测,故无需配置精密的干涉装置。多边法测量方法,是采用3路或者4路激光以不同角度跟踪测量被测点到测站间的距离、计算空间点位信息的^[5]。德国的PTB、日本的NRLM、英国的NPL等科研机构^[6],以及国内的清华大学、天津大学等均对多边法测量系统进行了研究,但它由于要利用多台测量设备,受便携性以及测站布局的影响,该系统尚未有成功应用于现场大尺寸远距离测量的相关报道^[7]。

本研究分析的双光斑重叠式PSD空间点位测量系统,将上述几种测量方法的优势结合起来,设计一种利用空间三角法原理,并将光电位敏传感器PSD作为测量靶标的一部分,用于测量系统的自动跟踪测量以及两光斑重合判断的空间点位测量系统。笔者搭建起测量平台、运动控制平台,设计编写基于逐次逼近法的自动跟踪算法和判断两光斑重合的点位测量算法,并将该测量系统与三坐标测量机进行试验对比研究。

1 空间坐标三角法测量原理

空间三角法测量空间坐标的原理示意图如图1所示,两束激光分别从O和O'射出,并在标靶点P点处重合。

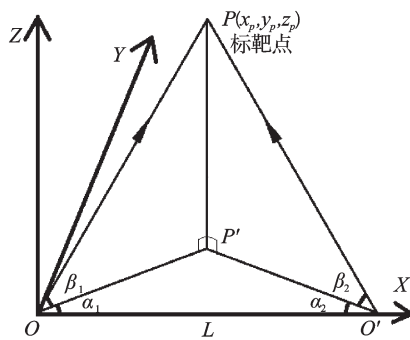


图1 空间坐标三角法测量原理示意图

OO'之间的距离为固定L,整个系统坐标系的建立是以O为原点,OO'方向为X轴正方向,Z轴竖直向上,Y轴根据右手定则来确定的,P点为测头的标靶点。已知参数 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、L,求标靶点P空间坐标 (x_p, y_p, z_p) ,通过参数 α_1 、 α_2 、L解三角形OO'P',由正弦定理可求得OP'或O'P'的值,由OP'或O'P'的值以及 α_1 或 α_2 ,通过解三角函数即可求出 x_p 、 y_p 的值,再由OP'或O'P'的值,以及参数 β_1 或 β_2 ,通

过解直角三角形OPP'或O'P'P可求出 z_p ,于是可以求出标靶点P的空间坐标^[8] (x_p, y_p, z_p) ,公式如下:

$$\begin{cases} x_p = \frac{\cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 L}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ y_p = \frac{\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 L}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ z_p = \frac{\sin \alpha_2 \cdot \tan \beta_1 L}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (1)$$

或:

$$\begin{cases} x_p = L - \frac{\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 L}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ y_p = \frac{\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 L}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\ z_p = \frac{\sin \alpha_1 \cdot \tan \beta_2 L}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_1, α_2 —水平方向上的两个角度量; β_1, β_2 —竖直方向上的两个角度量;L—OO'之间的固定距离。

2 空间点位测量系统

空间点位测量系统如图2所示,主要由整体测量平台、光路部分、两轴转动平台、PSD测头4部分组成。

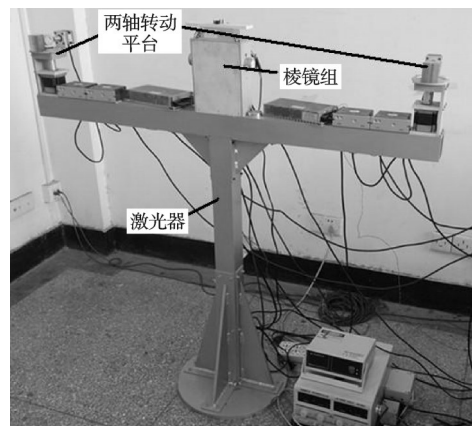


图2 空间点位测量系统

整体测量平台采用竖柱支撑横梁的方式,激光器嵌入在竖柱里面,激光器采用的是波长为632.8 nm的红光氦氖激光器,用于产生测量系统测量时所需要的光源。光路部分由一个分光棱镜、两个内反射棱镜和一个外反射棱镜构成一个棱镜组系统,棱镜组的作用是将入射的一束激光经棱镜组分光、连续反射后,出射时变为共线且射向相反的两束激光,该光束在两跟踪转镜间的距离就是三角法测量中三角形的一边L。两轴转动平台分布在横梁的两端,用于控制跟踪转镜的转动。

测量系统PSD测头部分如图3所示,是该测量系统的关键部分。

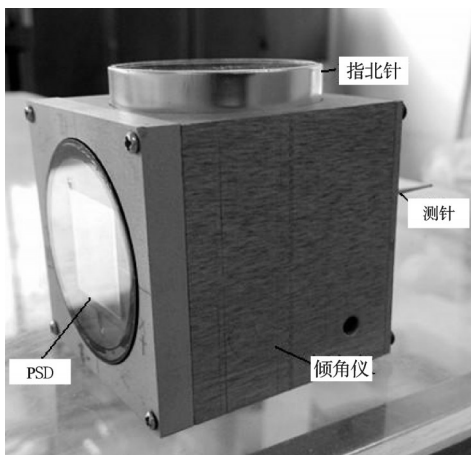


图3 测量系统PSD测头部分

它是将光电位敏传感器PSD、倾角仪、指南针、测针都集中在测头上。PSD采用的是二维枕型PSD,尺寸为20 mm×20 mm。PSD作为测头的主要部分,用于采集激光光斑位置信息,其采用逐次逼近算法,使两个光斑在PSD上轮流交替跟踪,实现测量系统的自动跟踪,并利用PSD对于光斑重心采集的原理,判断两光斑重合情况,进行空间点位信息的采集测量。倾角仪配合指南针用于采集并定位测头的偏转角度。测针用于与被测物体接触,其长度不等,根据被测对象表面情况,可更换不同直径和长度的测针。

双光斑重叠式PSD空间点位测量系统运行框图如图4所示。

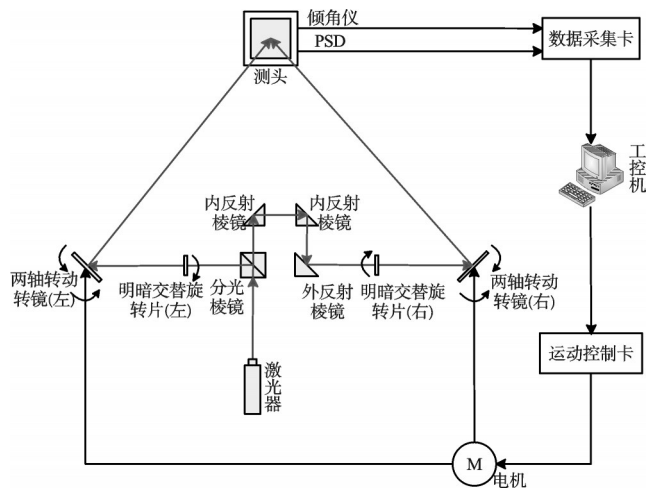


图4 双光斑重叠式PSD空间点位测量系统运行框图

激光器发出的一束激光经过棱镜组分光、连续反射后分为共线但射向相反的两束激光,这两束激光再经由两轴运动平台控制的跟踪转镜,反射重合在测头上的二维PSD传感器上,PSD产生的位置信号和倾角仪产生的角度信号经数据采集卡进入工控机进行数据处理,计算出被测点坐标。当测量下一点时,测头发生移动,PSD上产生的偏差信号经数据采集卡、工控

机,进入运动控制卡,其输出通过电机驱动两侧跟踪转镜转动,实现对目标的自动跟踪测量^[9]。该测量系统可以进行绝对坐标的测量,结构简单,光路的瞬间遮挡对测量结果不会产生影响。

测量时,系统自动跟踪算法采用的是逐次逼近算法,当激光光斑照射到偏离PSD坐标原点的位置时,PSD会根据光斑重心所在的位置,输出X、Y方向的信号,经处理板处理后,通过数据采集卡采集到工控机转换为光斑重心点偏离坐标原点的位置信号 Δ_x 、 Δ_y ,根据这个偏差位置信号,工控机通过运动控制卡控制电机带动跟踪转镜转动,依次减小 Δ_x 、 Δ_y 的偏差距离,使激光光斑在X、Y方向上逐渐向PSD坐标原点靠近,并最终使光斑重心点再一次落在PSD坐标原点处,实现系统的自动跟踪测量。

3 测量试验

试验以某型航空发动机8级涡轮转子叶片为测量对象,分别用三坐标测量机和双光斑重叠式PSD空间点位测量系统对其曲面进行测量。试验中使用的三坐标测量机是意大利DEA公司生产的型号为MISTRAL 070705的三坐标测量机,其主要性能指标为:分辨率0.5 μm ,有效行程710 mm×660 mm×460 mm,主体结构采用斜桥式气浮导轨,如图5所示。双光斑重叠式PSD空间点位测量系统的测量范围为水平横向3 m,前、后纵向5 m,上、下方向3 m,测量时,被测物体距离该测量系统纵向1.5 m远处。



图5 MISTRAL 070705三坐标测量机

试验中以某型航空发动机8级涡轮转子叶片为测量对象,曲面纵、横方向上长度分别为21 mm×21mm。试验时首先在测量曲面纵横方向上均匀地划分10×10的网格线,然后分别用三坐标测量机和该测量系统对曲面上100个点进行逐点测量。测量结束后,本研究通过坐标变换^[10],将两组测量数据转换到坐标原点都

位于被测物体表面左上角同一点的同一坐标系下,测量对象叶片曲面如图6所示。

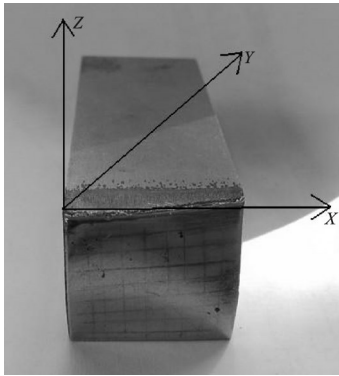


图6 某型航空发动机8级涡轮转子叶片曲面

根据每组数据的100个点,本研究分别在 Matlab 中拟合测量曲面,拟合曲面如图7、图8所示。

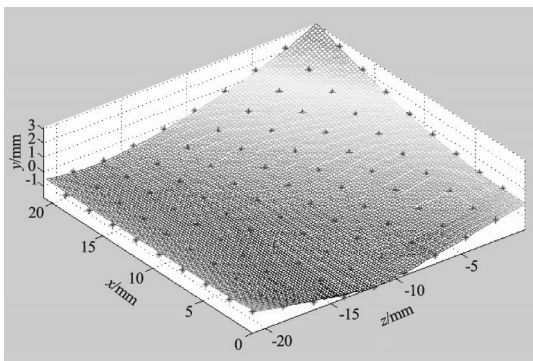


图7 Matlab 曲面拟合图—三坐标测量机

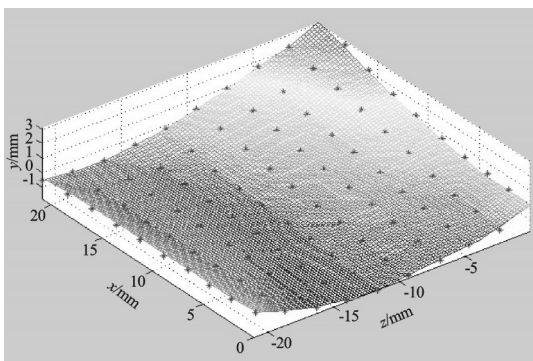


图8 Matlab 曲面拟合图—该测量系统

4 试验结果分析

通过 Matlab 拟合曲面后,本研究再用 Matlab 进行细网格,提取曲面上均匀分布的相同的 x 、 z 坐标点,比较两测量系统相对应 y 坐标值的偏差值。两坐标测量系统对应点 y 坐标值的偏差值表如表1所示,在测量曲面上—共均匀分布地取了30个坐标点进行对比。

通过表1中的数据,本研究分别绘制每一次测量点的二维 y 坐标偏差值变化曲线,如图9所示;以及对

表1 两坐标测量系统对应点 y 坐标值的偏差值表

序号	x/mm	z/mm	y/mm 三坐标测 量机	y'/mm 本测量系 统	偏差 $\delta_i = y' - y$ /mm
1	0	-2	-0.352 5	-0.516 5	-0.164 0
2	4	-2	-0.477 2	-0.325 8	0.151 4
3	8	-2	-0.133 0	0.198 4	0.331 4
4	12	-2	0.442 9	0.791 5	0.348 6
5	16	-2	1.176 6	1.572 3	0.395 7
6	20	-2	2.017 5	2.310 8	0.293 3
7	0	-6	-1.057 6	-1.306 1	-0.248 5
8	4	-6	-1.135 3	-0.918 9	0.216 4
9	8	-6	-0.776 1	-0.489 1	0.287 0
10	12	-6	-0.367 0	-0.150 3	0.216 7
11	16	-6	0.144 0	0.378 6	0.234 6
12	20	-6	0.769 5	1.070 1	0.300 6
13	0	-10	-1.762 6	-1.728 6	0.034 0
14	4	-10	-1.488 7	-1.436 0	0.052 7
15	8	-10	-1.188 6	-1.143 7	0.044 9
16	12	-10	-0.919 9	-0.923 1	-0.003 2
17	16	-10	-0.603 9	-0.542 3	0.061 6
18	20	-10	-0.139 1	-0.052 9	0.086 2
19	0	-14	-1.741 3	-1.585 5	0.155 8
20	4	-14	-1.507 6	-1.357 5	0.150 1
21	8	-14	-1.310 3	-1.166 2	0.144 1
22	12	-14	-1.172 9	-1.105 2	0.067 7
23	16	-14	-1.064 0	-1.040 6	0.023 4
24	20	-14	-0.768 3	-0.797 5	-0.029 2
25	0	-18	-0.913 0	-0.644 5	0.268 5
26	4	-18	-1.117 4	-0.899 5	0.217 9
27	8	-18	-1.033 1	-0.820 5	0.212 6
28	12	-18	-1.018 3	-0.807 0	0.211 3
29	16	-18	-1.011 7	-0.804 5	0.207 2
30	20	-18	-0.953 5	-0.648 1	0.305 4

应相同 x 、 z 坐标值的 y 坐标偏差值三维空间分布图,如图10所示。

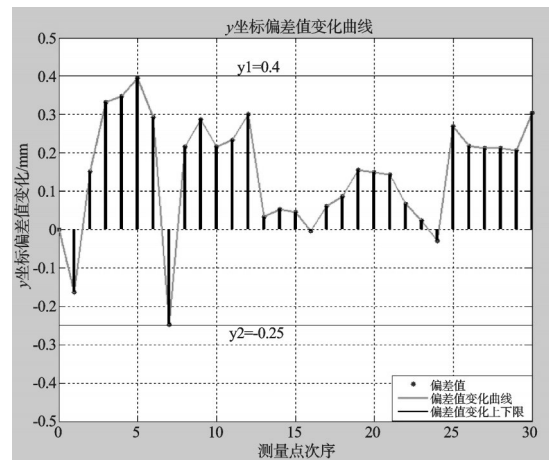


图9 y 坐标值偏差值变化曲线

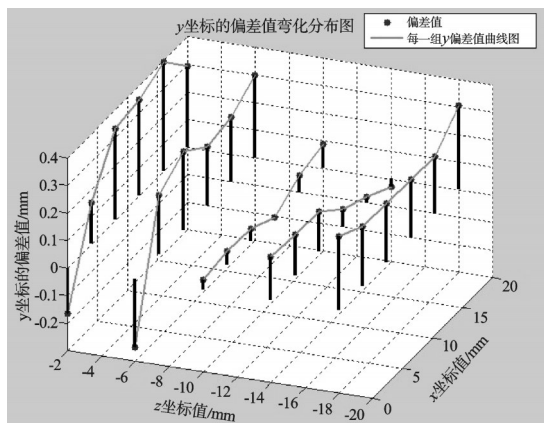


图10 y坐标值偏差变化分布图

通过上述图表,可以直观地看出y坐标偏差值的变化规律。双光斑重叠式PSD空间点位测量系统与三坐标测量机对应点,y方向上的偏差值 δ 的最大值为: $\delta_{\max}=0.3957\text{ mm}$,最小值为: $\delta_{\min}=-0.2485\text{ mm}$ 。 δ 绝对值的最大值为: $|\delta|_{\max}=0.3957\text{ mm}$,最小值为: $|\delta|_{\min}=0.0032\text{ mm}$ 。

偏差 δ 的算术平均值为:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{30} \delta_i}{30} = 0.152473\text{ mm} \quad (3)$$

偏差 δ 的标准偏差为:

$$S_{\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (\delta_i - \bar{\delta})^2}{30-1}} = 0.14925\text{ mm} \quad (4)$$

上述图表中数据表明,双光斑重叠式PSD空间点位测量系统相对于三坐标测量机的偏差值分布在 $\delta=0$ 上下。正偏差值维持在 0.4 mm 以内,负偏差值维持在 -0.25 mm 以内,平均偏差为 $\bar{\delta}=0.152473\text{ mm}$,标准偏差为 $S_{\delta}=0.14925\text{ mm}$,基本满足大尺寸坐标测量的要求。影响测量系统精度的因素主要包括激光点初始定位精度,PSD采集位置信号的精度、数据采集卡采集模拟信号时的干扰信号影响、倾角仪的精度、被测曲面的拟合与提取算法、温度和光照影响等因素,在进一步优化点位提取算法、减少干扰信号的影响、改善测量条件的基础上,系统的测量精度还有较大的提升空间。

5 结束语

本研究介绍了一种新型空间点位测量系统—双

光斑重叠式PSD空间点位测量系统,其测量原理为:采用简单的空间三角法,利用光电位敏传感器PSD作为测头的主要部分,用于接收经跟踪转镜反射的两束激光,通过两光斑在PSD上的逐次逼近跟踪,实现测量系统的自动跟踪,并通过PSD来判断两光斑重合情况,实现测量系统空间点位测量。该系统操作简单,精度高,测量效率高。试验结果表明,该测量系统可以准确有效地进行空间点位自动跟踪测量。目前,系统坐标值的测量偏差维持在 $-0.25\text{ mm} \sim 0.4\text{ mm}$ 以内,满足某些大尺寸测量场合的要求。但系统的精度还有待提高,应进一步优化激光光斑重心点和被测目标点的提取算法,减少干扰信号的影响,使测量结果提高到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 量级,以适用更多的大尺寸精密测量场合,使测量系统适应更加复杂的工业环境,进一步拓宽测量系统的适用范围和应用场合。

参考文献(References):

- [1] SHIRINZADEH B, TEOH P L, TIAN Y, et al. Laser interferometry-based guidance methodology for high precision positioning of mechanisms and robots [J]. **Robotics and computer integrated manufacturing**, 2010, 26(1): 74-82.
- [2] 张亚娟, 裘祖荣, 李杏华, 等. 基于PSD的激光跟踪坐标测量系统[J]. **传感器与微系统**, 2011, 30(7): 116-119.
- [3] 陈曦. 激光跟踪系统设计[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2007.
- [4] 张滋黎, 郝继贵, 耿娜, 等. 双经纬仪三维坐标测量系统设计[J]. **传感技术学报**, 2010, 21(5): 660-664.
- [5] HUGHES E B, WILSON A, PEGGS G N, Design of a high-accuracy CMM based on multi-lateration techniques [J]. **CIRP Annals**, 2000, 49(1): 391-394.
- [6] TAKATSUJI T, GOTO M, KIRITA A, et al. The relationship between the measurement error and the arrangement of laser trackers in laser trilateration [J]. **Measurement Science and Technology**, 2000, 11(5): 477-483.
- [7] 周虎. 基于视觉的目标跟踪与空间坐标定位系统研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2011.
- [8] 周富强, 张广军, 江洁, 等. 现场双经纬仪三维坐标测量系统[J]. **机械工程学报**, 2004, 40(1): 165-169.
- [9] CHEN Xiao-rong, CAI Ping, SHI Wen-kang, et al. Dynamic measuring the position of a moving object based on laser tracking system [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2004, 25(6): 777-780.
- [10] 熊有伦. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

孙玉玺, 陆永华. 双光斑重叠式PSD空间点位测量系统研究[J]. **机电工程**, 2014, 31(2): 145-149.

SUN Yu-xi, LU Yong-hua. Spatial coordinates measurement system based on double spots overlapped PSD [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014, 31(2): 145-149.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>