

# 三自由度平行臂式薄膜倾斜角溅射装置设计

王伟<sup>1,2</sup>, 桓茜<sup>1,2</sup>, 靳浩斌<sup>1</sup>, 丁天昱<sup>1</sup>

(1. 陕西工业职业技术学院 航空工程学院; 2. 咸阳市太阳能光热转换材料重点实验室, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:**常规上-下布局式系统中溅射平台存在倾斜角度调节范围小,公转、自转、摆动三自由度缺乏自动独立受控、多角度联动控制的问题。为了实现三个自由度的协同联动控制,设计了一种平行臂式三自由度协同驱动型薄膜倾斜角溅射平台。装置采用平行臂+中枢传动机构的设计布局,实现了实验台以中枢传动轴为原点的公转、自转、摇摆三个自由度的单个独立驱动、协同联动控制、连续角度变换控制,工件可以在 $0\sim 90^\circ$ 范围的不同角度和方位上连续溅射,适合于单一/多个靶材的共溅射或者复杂工件的变角度/变方位溅射。装置创新设计了Y字型中枢传动机构,实现了平行臂的摇摆和实验台的自转的混联传动目的,此外设计了 $0\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 的工件加热能力,利用电磁制动器进行装置制动与紧急停止。整体结构设计的自动化程度高、控制精度高、结构可靠性高,广泛应用于新型显示、半导体、信息存储、模具镀膜等领域。

**关键词:**磁控溅射;三个自由度;样品台;协同联动

中图分类号:TB77; TN305; TH112 文章编号:1000-0682(2026)01-0026-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.01.005

## Design of a 3-DOF parallel arm tilt angle sputtering device for thin films

WANG Wei<sup>1,2</sup>, HUAN Xi<sup>1,2</sup>, JIN Haobin<sup>1</sup>, DING Tianyu<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautical Engineering, Shaanxi Polytechnic University, Shaanxi Xianyang 712000, China;

2. Xianyang Key Laboratory of Solar Thermal Conversion Materials, Shaanxi Xianyang 712000, China)

**Abstract:**In the conventional top-down layout systems, the sputtering platform has the problems of small tilt angle adjustment range and lack of automatic independent control and multi-angle linkage control of the three degrees of freedom (3-DOF) of revolution, rotation and swing. To realize the coupling control of three degrees of freedom, a 3-DOF parallel arm collaborative driving film tilt angle sputtering platform was designed. The design layout of parallel arm and central transmission mechanism was adopted to realize the purpose of single independent driving, collaborative linkage control, and continuous angle transformation control of the three degrees of freedom of revolution, rotation, and swing of the test platform with the pivot transmission axis. The workpiece can be sputtered continuously at different angles and directions in the range of  $0\sim 90^\circ$ , which was suitable for co-sputtering of single/multiple targets or variable angle/azimuth sputtering of complex accessories. The Y-shaped central transmission mechanism was innovatively designed to realize the hybrid transmission of the swing of the parallel arm and the rotation of the test bench. In addition, the heating capacity of the workpiece at  $0\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$  was designed, and the electromagnetic brake was used for device braking and emergency stop. The overall structure design has a high degree of automation, high control accuracy, and high structural reliability, and is widely used in fields such as new displays, semiconductors, information storage, and mold coating.

**Keywords:** magnetron sputtering; three degrees of freedom; specimen holder; collaborative linkage

收稿日期:2025-08-12

基金项目:国家自然科学基金(52401098);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-YBMS-271);咸阳市渭城区科技发展计划项目(2024VCZY-005);陕西工业职业技术学院科研基金资助项目(2025YKZD-004)

第一作者:王伟(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为薄膜功能化调控及应用。E-mail:wangwei05@sxpi.edu.cn

## 0 引言

随着“中国制造 2025”、“工业 4.0”的推进,智能化、数字化、信息化逐步成为工业生产的主流趋势<sup>[1-2]</sup>。磁控溅射镀膜设备是电子显示、触控面板、动力电池以及集成电路等下游新兴产业中重要原材料的关键设备,在国家政策支持和下游产业多元化需求推动下,磁控溅射行业迎来了新一轮发展<sup>[3-5]</sup>。

磁控溅射镀膜设备属于高新技术装备,是表面工程技术领域的主流技术<sup>[6-7]</sup>,目前真空磁控溅射系统中,常规溅射布局方式是靶材安装下系统下方,样品台安装在系统上方,国内产品像沈阳鹏程 CK450、沈阳科仪 TRP450 等,这种上-下布局方式的工件表面通常垂直于靶材发射的粒子流,同时为了增加薄膜的均匀性,会将支撑工件的实验台设置为旋转平台<sup>[8-10]</sup>。

对于复杂掠入射镀膜工艺,工件表面不再垂直入射粒子流,而是与入射粒子流成特定倾斜角度,工件表面先沉积的纳米薄膜对后续入射到表面上粒子产生自阴影效应,形成一种特殊结构性质<sup>[11-13]</sup>。这就要求工件表面不再是水平布置,而是与靶材之间的角度任意调节,在倾斜表面上能够自动旋转以保证镀膜均匀性。

对比公开技术方案,一种常规上-下布局方式样品台<sup>[14]</sup>,工件只有一个水平旋转自由度,工件与靶材平行且倾角不能自动调节,或者只能镀膜之前手动松开固定螺栓调节一个小角度<sup>[15]</sup>。另一种上-下布局的溅射平台<sup>[16]</sup>,工件安装在实验台边缘处,平行于靶材在圆周上均匀分布,虽然工件公转的同时可以自转,但是薄膜溅射周期较短,薄膜沉积速率慢,薄膜质量相对较差。进一步地,要想调节边缘处工件的倾斜角度,只能在镀膜开始前手动调整工件装夹台的倾角<sup>[17]</sup>,使用螺栓固定安装,在镀膜开始后无法任意改变工件的倾角,这种手动调节的自由度不能与公转或自转联动控制。对于下游产业中新兴的复杂精密或异型工件,上述溅射方式存在较多的应用弊端,为此,亟需设计一种具备公转、自转、摆动三个自由度的独立调节、协同联动控制的全自动镀膜平台。

为了实现不同自由度之间的协同联动控制,通过平行臂和中枢传动机构的设计,整合了多组独立驱动的传动机构(公转、自转和摇摆传动机构),实现了工件表面在 0~90°范围内的三个自由度之间的单个独立或协同联动的自动控制,对实验台设计

了 0~700℃ 的高温加热功能、电磁制动保护功能。整体结构设计具备良好的技术通用性,对真空镀膜技术行业的发展和下游新兴产业的发展有着极大推动作用。

## 1 平行臂式三自由度协同驱动平台设计

针对常规上-下布局式溅射样品台不能满足复杂异型工件多角度、多方位的联动控制镀膜要求的问题,如图 1 所示,设计了一种平行臂式三自由度协同驱动型薄膜倾斜角溅射平台,整体设计包含了实验台、传动塔、中间框体结构、公转驱动组件、自转运动机构、摇摆运动机构、外壳和接线槽等,实现了实验台以传动塔上端的中枢传动轴为原点,进行公转、自转、摆动三个自由运动之间的独立、协同、连续角度变换的自动控制<sup>[18]</sup>。

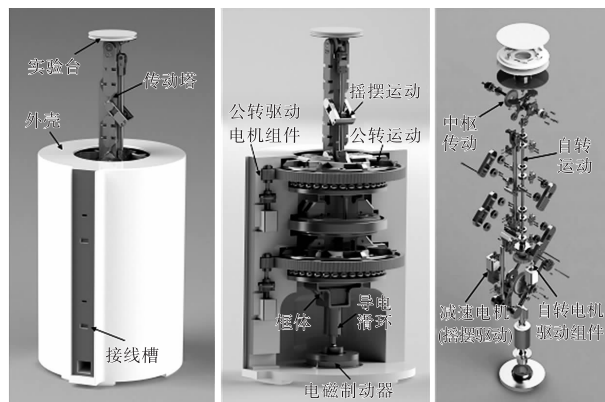


图 1 平行臂式混联驱动型镀膜平台

其中,外壳对整体结构进行承载和密封,公转驱动电机组件负责驱动中央动作机构,带动载物实验台做公转运动,电磁制动器进行制动和急停控制。所谓中央动作机构主要由传动塔、实验台、中枢传动机构、框体结构、自转运动机构、公转运动机构、摇摆运动机构构成。公转驱动电机组件安装在框体外周壁,自转和摇摆运动机构安装于框体内部,框体位于外壳内腔中部。传动塔作为一个传动延长机构,安装于框体顶部,可按设计要求进行调整。在中枢传动机构作用下,由自转、摇摆运动机构分别控制实验台自转和摇摆。

三个自由度依靠三个步进电机进行独立驱动,可以选择 42 系列两相步进电动机和 256 细分步进电机驱动器进行独立驱动控制,用于调节转速比和倾角大小。步进电机和驱动齿轮之间用电磁离合器连接<sup>[19]</sup>,当实验台处于加速或匀速运行阶段,电磁离合器通电,将步进电机输出的动力直接传递给驱动齿轮,带动齿轮转动;当处于减速或急停工况,电



### 2.3 平行臂式倾斜角传动机构设计

图 4 所示为平行臂式倾角传动控制的内部结构,平行连杆和平行臂均设置于传动塔一侧,平行连杆通过连接杆头与平行臂传动连接,而它们之间又通过轴承固定结构与主传动轴连接在一起,达到稳定的传动作用,同时平行臂还承担了连杆之间的动力传递作用。轴承固定结构包括两个间距相同的对置圆锥滚子轴承和限位块。此外,平行连杆和平行臂之间通过接头、连接块、固定块、圆锥滚子轴承传动连接。摇摆控制齿轮上设置了两个夹角为 90° 的限位开关,通过调节限位开关的启闭达到摇摆控制盘的旋转控制,进而调节平行臂的倾角摆动。摇摆控制盘分为左右两片,固定在摇摆控制齿轮的两侧,并在其末端设置了两个配重块进行一定的重力补偿,减轻电机的工作压力。

实验台在倾斜 45°、水平、垂直工作状态下的运动关系,如图 5 所示,驱动平行臂、平行连杆、Y 型实验台架、摇摆控制盘直接构成多个平行四边形结构,它们之间具有相同的摆动角度,实现平行臂式 0 ~ 90° 倾斜角运动控制。

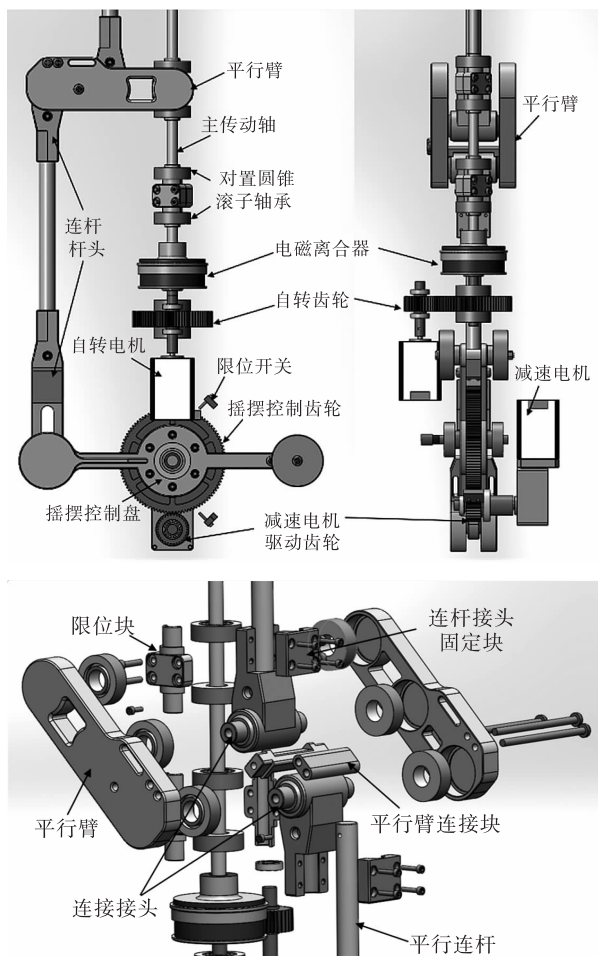


图 4 倾角摇摆传动机构设计图

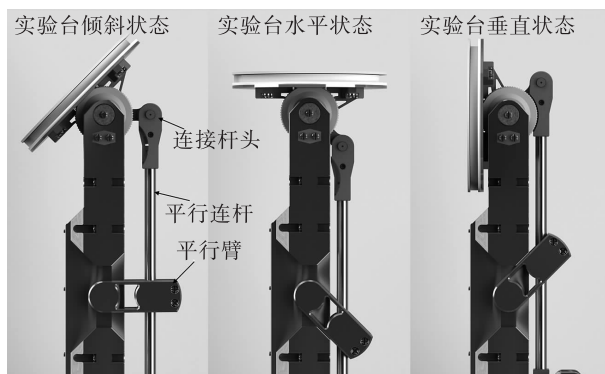


图 5 实验台的运行工作状态图

### 2.4 Y 字型中枢传动机构设计

实验台及中枢传动机构如图 6 所示,其中实验台由实验盘、加热盘、隔热衬垫、托盘及推力球轴承等构成,实验台相关组件均为高温材料制成,除加热棒、热电偶之外没有其他电子元件,可承受 0 ~ 700 °C 高温工况。中枢传动机构包含了实验台架、实验台中枢传动轴、实验台自转齿轮、中枢传动齿轮、主动轴顶部传动齿轮,它们组成的可变角传动锥齿轮组,实现了工件的自转运动。

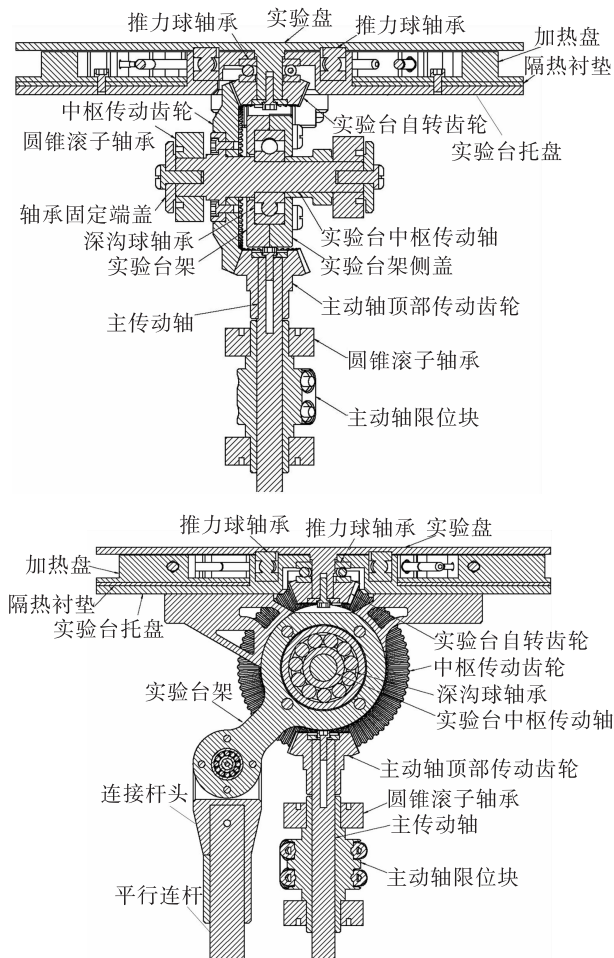


图 6 平行臂摆动 - 自转混联机构图

实验台架是一个 Y 字型结构,如图 7 所示,安装在实验台中枢传动轴上,并将其作为倾斜变化的旋转轴。实验台架的底部通过连接杆头与平行连杆传动连接,顶部安装在实验台托盘上,在平行臂和连杆所构成的平行四边形运动机构作用下,依靠摇摆传动机构的倾角驱动,带动 Y 型实验台架相同倾角运动,从而实现了实验台的摇摆运动。

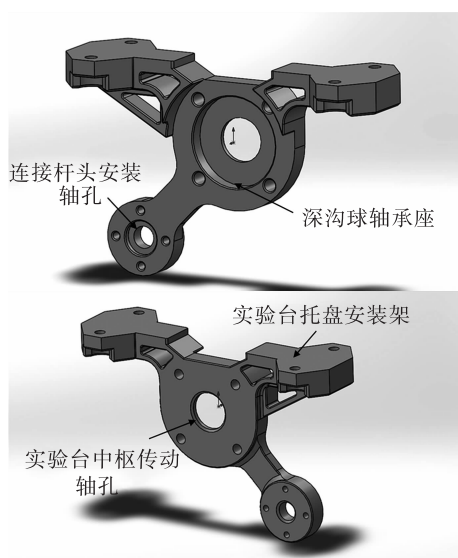


图 7 Y 字型实验台架图

### 3 工件的倾斜角工作状态演示

综上所述,利用中枢传动机构、公转传动机构、自转传动机构、摇摆传动机构实现了工件的公转、自转、摇摆三个自由度的独立、协同、连续变角度的自动控制。如图 8 所示,其工作过程如下:

(1) 将基材安装在实验盘表面上,利用加热盘对基材进行温度调控;

(2) 启动公转电机,实验盘通过中枢传动轴与传动塔连接,通过公转传动组件驱动传动塔转动,进而使实验台进行公转运动;

(3) 启动自转电机,实验盘通过中枢传动机构与传动塔上端的顶部传动齿轮传动连接,而其又与主传动轴相连接,通过自转传动机构的驱动,实现实验台的自转;

(4) 启动减速电机,实验盘通过实验台架与平行连杆和平行臂连接,通过摇摆传动机构的驱动,实现实验台的  $0 \sim 90^\circ$  倾角摆动。

在实验台垂直状态下,与 Y 字型实验台架连接的连接杆头上设有中枢传动齿轮让位槽,以保证  $0 \sim 90^\circ$  的摇摆角度运动范围内,不与中枢传动齿轮发生干涉,保证三个自由度的稳定控制。

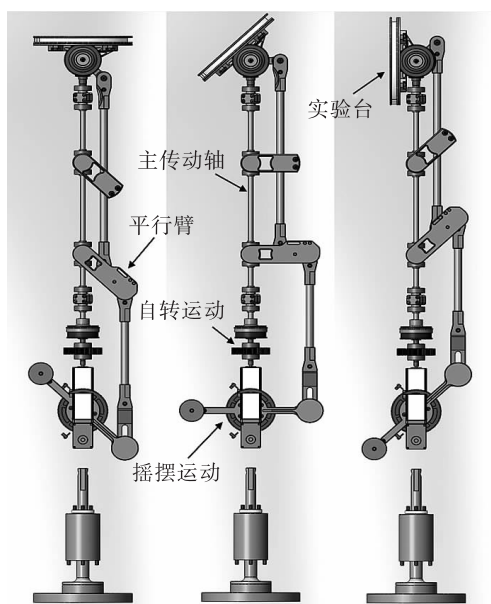


图 8 实验台的不同角度工作状态示意图

综上所述,所提出平行臂式混联驱动式倾斜角溅射平台,创新性地实现了工件在  $0 \sim 90^\circ$  空间内公转、自转及倾角调整的三个自由度独立/协同运动控制,有效解决了传统磁控溅射平台存在的倾角调节范围受限、多自由度耦合控制困难等技术瓶颈。相较于现有镀膜平台,该平台具有以下优势:其一,创新设计混联运动机构实现了各自由度运动解耦,既可实施单自由度独立运动控制,亦可实现双自由度或三自由度复合运动模式;其二,实现了倾角参数的精准调节,突破了传统机械式手动调节的操作限制,工件在复杂运动过程中仍能保持  $0 \sim 90^\circ$  倾角的实时可调性;其三,合理的运动系统空间布局,实现了模块化设计,提升了设备集成度。所设计混联驱动式平台可适应多类型薄膜沉积工艺需求,具有显著的技术先进性和工程应用价值。

### 4 结论

该文针对上-下布局式多靶溅射系统无法实现复杂工件多方位变角度连续溅射要求问题,开发了一种平行臂式三自由度协同驱动型薄膜溅射平台,结构上设计了公转传动机构、自转传动机构、倾角传动机构,实现了实验台在传动塔上端中枢传动轴为原点作公转、自转、倾角摆动三个自由度的独立/协同的连续自动控制,主要结论如下:

(1) 采用平行臂式中枢传动机构,设计了一种兼具公转、自转和摇摆三个方向的自由度,并且能够独立、协同、连续自动控制的溅射平台,结构上设计了中枢传动机构、公转和自转驱动/传动组件、平行

臂-连杆传动组件、Y 字型实验台架,各个机构之间的协同控制实现三自由度的联动控制;

(2)混联驱动平台通过三套独立运动机构,可以实现三个自由度的协同自动控制,使样品能在不同角度和方位上连续掺杂溅射镀膜,有效解决了常规磁控溅射样品台的倾斜角度不能自动控制、三自由度不能联动控制的难题。

#### 参考文献:

- [1] 许泽宇,胡明,刘杰,等. 溅射镀膜单体机真空系统设计及性能分析[J]. 真空科学与技术学报, 2024: 1 - 10.
- [2] 王浪平,孙田玮. 液态靶材磁控溅射技术研究进展[J]. 真空与低温,2024,30(5): 496 - 503.
- [3] WANG W, HUAN X, LI Y H. Spectral response and structural analyses of reactively sputtered molybdenum oxides for selective solar absorption[J]. Ceramics International, 2021, 47(13): 18893 - 18897.
- [4] LI W, LIN C J, HUANG G. Selective solar harvesting windows for full - spectrum utilization [J]. Advanced Science, 2022(9): 2201738.
- [5] ZHANG W H, ZHANG J, WANG C B, et al. Color/translucent Bi - customizable solar antifogging nanofilms [J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19: 2400931.
- [6] 范志鹏,韩辉,张松林. 多功能复合磁控溅射平台的应用研究[J]. 现代机械,2024(2):12 - 16.
- [7] WANG W, HUAN X, WANG C B, et al. Self - organization of Mo nanoparticles embedded in MoOx matrix for efficient solar energy absorption [J]. Solar Energy, 2020, 208: 665 - 673.
- [8] 王栋,蔡长龙,弥谦,等. 圆筒式磁控溅射靶的磁场仿真与结构设计[J]. 表面技术,2023,52(8):371 - 379.
- [9] 汪洪波,杨林生. 全自动真空磁控溅射镀膜仪研制[J]. 实验技术与管理,2011,28(4):58 - 60.
- [10] 卢进军,刘卫国,潘永强,等. 光学薄膜技术[M]. 北京:电子工业出版社,2020.
- [11] Barranco A, Borrás A, González - Elipé A R, et al. Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices[J]. Progress in Materials Science, 2016, 76: 59 - 153.
- [12] Sanchez - Valencia J R, Longtin R, Rossell M D, et al. Growth assisted by glancing angle deposition: a new technique to fabricate highly porous anisotropic thin films [J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2016, 8: 8686 - 8693.
- [13] Gaydaychuk A, Linnik S, Mitulinsky A, et al. Glancing angle intermediate layer deposition approach for CVD diamond coating of high - speed steel substrates[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 45: 103839.
- [14] 李皓瑜,刘宇翔,张建红,等. 一种磁控溅射装置和磁控溅射设备:201821184166.3[P]. 2019 - 03 - 15.
- [15] 黄永长,龙汝磊,吴萍,等. 一种镀膜室用基板装载装置: 201910686560. X[P]. 2019 - 10 - 15.
- [16] 闻益. 一种旋转样品台:201510077375.2[P]. 2017 - 07 - 11.
- [17] 刘维龙,王伟,卢成,等. 基片真空镀膜角度可调多级行星工件架机构: 202311802026. 3 [P]. 2024 - 03 - 19.
- [18] 王伟,郑旭飞,桓茜,等. 一种平行臂式三自由协同驱动型薄膜掠射角溅射平台: 202210597844. 3 [P]. 2023 - 08 - 22.
- [19] 张以忱. 真空镀膜技术与设备[M]. 北京:冶金工业出版社,2021.
- [20] 刘长林 陆艳君,安辉,等. 真空镀膜设备收放系统用多电机协同控制分析[J]. 电工技术,2024 (18): 29 - 33.
- [17] 叶高文. 基于 S7 - 200 PLC 的污水处理自控系统设计[J]. 工业控制计算机,2014,27(12):150 - 151.
- [18] 曾喜娟,庄其仁,吴志华. 基于 S7 - 200 PLC 的 PID 参数自整定方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010 (01):47 - 50.
- [19] 李静,董斌,熊联友,等. 基于西门子 S7 - 200 PLC 自由口通信的气体分离实验台测控系统[J]. 低温工程,2015(06):6 - 10 + 66.

(上接第 19 页)