

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19920131152926UDC_____

厦 门 大 学

硕士学位论文

基于 CANopen 总线的精密伺服二维跟踪系统

A precise two dimensional tracking servo system based on

CANopen bus

欧阳琪楠

指导教师姓名: 方 正 副 教 授

专 业 名 称: 机 械 工 程

论文提交日期: 2 0 1 6 年 月

论文答辩时间: 2 0 1 6 年 月

学位授予日期: 2 0 1 6 年 月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2016 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月

摘要

在航空航天、民用、军事领域都起到重要作用的双自由度转台是一种复杂的集光机电一体化的设备，整体设备的精度和性能将直接受其性能的影响。因此，如何同时获取良好的动态性能、较小的体积重量、足够的旋转扭矩以及较小的噪声振动是本文亟需解决的问题。

本文根据中波红外光谱分析技术和长波红外成像双波段结合的红外光谱仪设备技术要求，设计了双自由度转台。该转台采用美国 COPLEY 公司的 CANPCI 卡作为 CAN 通讯卡，两台 COPLEY 驱动器分别作为主机与从机直接驱动作为执行机构的两台交流伺服电机，实现两个自由度上的运动，从而控制负载到达指定位置。此二维伺服系统采用位置环、电流环、速度环的控制策略，实现精确稳定地控制位置伺服的目的。

在完成二维转台整体硬件搭建后，利用 CME 软件进行设备调试，同时编写上位机控程序。在仿真试验中通过模拟目标位置 and 实际位置，验证控制策略和优化控制参数；在外场试验中，结合实际情况通过跟踪目标飞机分析并调节 PID 参数。

在仿真试验中，按照仿真设定进行模拟跟踪，在跟踪低、中速目标时，1 秒内可以进入稳定跟踪状态，并可以将稳态误差保持在 1 个像素点内。在跟踪高速目标时，也可以在 1 秒内进入稳定状态，并将稳态误差保持在 2 个像素点左右。总体上，由于水平轴电机承载整体设备重量，在跟踪性能上稍弱于俯仰轴。在外场试验中，验证了本文的二维伺服转台在实际情况中可以很好的实现跟踪目标飞机，满足整体设备要求。

关键词：二维转台；伺服控制；PID 跟踪

Abstract

Two-axis turntable is a complex set of mechanical and electrical integration of modern equipment, and plays an important role in civilian, military and aerospace fields, and its performance directly affects the accuracy and performance of the entire apparatus. Therefore, how to obtain simultaneously good dynamic performance, small volume weight, sufficient rotational torque and less noise vibration is an urgent problem we have to solve. Based on the technical requirements of the medium wave infrared spectroscopy and IR imaging with dual band infrared spectrometer equipment, we designed the two-axis turntable. The CAN communication card of the two-axis turntable is the COPLEY's CANPCI card, and the executing agencies of the two-axis turntable are two brushless AC servo motors which can achieve the two degrees of freedom movement. This system uses a two-dimensional servo control strategy for current, speed and position loop, which can achieve the purpose that the position servo can be controlled accurately and stably.

After hardware construction of the two-axis turntable, we use the CME software to debug the equipment, and at the same time we write the PC control program. Taking full advantage of COPLEY servo driver and Harmonic drive, we validate the control strategy and optimize the control parameters by target location data and actual location data in the simulation test. We analyze and adjust the PID parameters by tracking the target aircraft in the field experiment.

In the simulation test, do the simulate tracking according to the set of simulation, the two-axis turntable has very good tracking ability when tracking the low and medium speed targets. In this situation the two-axis turntable can be into the stable tracking in 1 second, and the steady-state error is kept within 1 pixel. When the target with high speed, the ability of tracking of turntable play a little weaker, but it can also be into the stable tracking in 1 second, and the steady-state error was kept within two pixels. Overall, since the horizontal axis motor carrier overall weight of the device, its performance in tracking target was weaker than the pitch axis. In the outfield experiment, the two-axis turntable was proved it could track the plane targets well in actual situation, and meet the overall equipment requirements.

Key Words:two-axis turntable; servo control; PID tracking

目录	
摘要	I
Abstract	II
第一章绪论	1
1.1 选题背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 伺服系统.....	2
1.4 课题主要研究内容.....	3
第二章总体设计	6
2.1 系统总体方案.....	6
2.1.1 技术要求.....	6
2.1.2 整体方案.....	6
2.1.3 转台工作原理.....	9
2.2 系统设计.....	9
2.2.1 系统整体设计.....	9
2.2.2 数字伺服系统误差分析.....	13
2.3 转台机械结构.....	15
2.3.1 技术方案.....	15
2.3.2 机械结构介绍.....	16
2.4 核心部件选型.....	18
2.4.1 执行元件选型.....	18
2.4.2 驱动器选型.....	20
2.4.3 CANPCI 卡选型.....	23
2.5 通讯方式.....	24
2.6 设备调试.....	29
2.6.1 调节电流环.....	30
2.6.2 调节速度环.....	33
2.6.3 调节位置环.....	35
第三章软件设计	39
3.1 系统控制软件整体方案.....	39
3.1.1 整体设计方案.....	39

3.1.2 关键技术	39
3.1.3 功能需求分析	42
3.2 方案实现	44
3.2.1 总体架构	44
3.2.2 功能模块设计	45
3.2.3 操作界面设计	50
第四章实验	53
4.1 仿真实验	53
4.1.1 追踪空间	53
4.1.2 实验描述	53
4.1.3 实验结果	55
4.1.4 实验总结	56
4.2 外场实验	58
4.2.1 实验描述	58
4.2.2 实验结果	59
4.2.3 实验总结	61
第五章总结与展望	63
参考文献	64
攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果	66
致谢	67
附录 1：部分 CANopen 指令和对应的 RS232 指令	68
附录 2：故障记录与解决方法	69

Contents	
Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
1 Introduction	1
1.1 Background and significance	1
1.2 Research status	1
1.3 Servo system	2
1.4 The main research topics	3
2 Overall Design	6
2.1 The overall system plan	6
2.1.1 Technical requirement.....	6
2.1.2 Overall program.....	6
2.1.3 Principle of Turntable.....	9
2.2 System design	9
2.2.1 Overall system design.....	9
2.2.2 Digital servo system error analysis.....	13
2.3 Turntable mechanical structure	15
2.3.1 Technical solutions.....	15
2.3.2 Mechanical structure introduction.....	16
2.4 Selection of core components	18
2.4.1 Actuator selection.....	18
2.4.2 Driver selection.....	20
2.4.3 CANPCI card selection.....	23
2.5 Communication method	24
2.6 Equipment commissioning	29
2.6.1 Adjust the speed loop.....	30
2.6.2 Adjust the speed loop.....	33
2.6.3 Adjust the position loop.....	35
3 Software design	39
3.1 Overall plane of system software	39
3.1.1 Overall design.....	39

3.1.2 Key technology.....	39
3.1.3 Functional requirements analysis	42
3.2 Achievement of plane.....	44
3.2.1 Overall architecture.....	44
3.2.2 Module design.....	45
3.2.3 Interface design.....	51
4Experiment.....	53
4.1 Simulation experiment.....	53
4.1.1 Tracking space.....	53
4.1.2 Experiment description.....	53
4.1.3 Experiment results.....	55
4.1.4 Experimental summary.....	56
4.2 Field test.....	58
4.2.1 Experiment description.....	58
4.2.2 Experiment results.....	59
4.2.3 Experimental summary.....	61
5Summary and Outlook.....	63
References.....	64
Published papers and achieved research results during the master's degree.....	66
Thanks.....	67
Appendix 1 : partial CANopenorders and RS232orders	68
Appendix 2 : Fault recorder and solution.....	69

第一章 绪论

1.1 选题背景与意义

二维转台一种复杂的光机电一体化设备，其主要由为系统提供动力的原动机、将动力通过特定结构传递给执行机构的传动机构和最终的执行机构组成。常应用于各行各业，在民用中，常用于数控机床、加工中心、机器人等机构；在军事宇航领域，常用于模拟探测目标的空间分布或探测器本身在空间中的目标搜寻^[1]，比如雷达天线、火炮瞄准等。红外制导是精确制导武器的一种重要制导方式。特别是作为红外制导导引头的伺服机构^[2]，双自由度转台的性能对导引头有着重大影响。无论是战略弹道导弹，还是战术导弹，都向体积小、射程远、速度快、制导精度高等方向发展，以满足未来战争的要求^[3]。相应地，双自由度转台必须能适应这种趋势的发展，减小体积、提高控制精度。目前，用于红外追踪的双自由度转台主要是利用两种电机进行运动控制：一种是名称为“双自由度云台”所用的步进电机，但步进电机具有噪声大、动作点离散、回程间隙误差大、动态性能差等缺点，无法满足精确控制的要求；另一种是力矩电机^[4]，虽然能获得较好的动态特性和精度，但需要外加齿轮减速机构，体积大、相较于步进电机略显笨重。因此，如何同时获取良好的动态性能、较小的体积重量、足够的旋转扭矩以及较小的噪声振动是双自由度转台亟需解决的问题。

随着自动控制技术的发展，伺服电动机的应用范围日益广泛，对其性能的要求也在不断提高另外新技术、新材料的出现也为伺服电动机的发展提供了可能，促使它有了很大发展，涌现出许多新型的结构^[5]。如快速响应低惯量的盘形电枢直流电动机、空芯杯电枢直流电动机和无槽电枢直流伺服电动机；为了适应高精度低速度伺服系统的需要取消了减速机构的直接驱动负载的直流力矩电动机等。在自动化等学科中伺服控制技术是非常重要的一个分支。近年来随着计算机技术和微电子技术的快速发展，社会的各个领域几乎都可以发现伺服技术的应用。伺服技术与计算机技术的相结合已在伺服控制中占有重要地位^[6]。

1.2 国内外研究现状

在转台领域无论是品种、精度、或者自动化程度，美国的技术水平都远超其他国家的技术^[7]。第一台 A 型转台由美国麻省理工学院在 1945 年研发，其动力来源是一台力矩电机，角度测量利用的是滚珠微动开关。B 型伺服转台于 1950 年研发成功，C 型转台于 1953 年研发成功并采用了精密齿轮。D 型转台采用光电测量系统和精密锥形滚珠轴承，因而大大提升转台性能，于 1954 年研发成功并投入使用，标志转台技术进入一个新的发展阶段。后续美国开始使用计算机作为控制中心，例如菲克公司的 5768 型双轴转台和 3768 型单轴转台。70 年代末美国 CGGC 公司研发的 30H 系列产品可提供多种编码与控制功能，运用了现代电子设计及封装技术，可提供精密速率控制以及绝对位置控制等功能。

中国大概在 60 年代中期才开始研发转台技术，虽然相对于早在 40 年代就开始研发转台技术的美国等发达国家来讲，我国起步比较晚，但是整体技术发展迅速。从 1966 年的 DT-1 单轴转台，到“7191”双轴空气轴承转台以及随后研发的 SSFT 伺服转台，中国转台技术在精度、功能、可靠性上不断突破。SGT-1 型三轴台是我国第一台借助计算机作为控制的高精度三轴转台，于 1992 年研发，此转台在很大程度上提升了精度和自动化水平。在 2004 年，哈工大研制出我国首台 SCT-1 型三轴精密测试转台^[8]。随后由航空部 303 所研制出性能达到国际水平的 SJT-1 型三轴精密转台。

虽然我国暂时无法与美国等发达国家技术媲美，但发展速度快，并已涌现一批达世界先进水平的研发机构，比如航空部 303 所、哈尔滨工业大学等。然而毕竟我国转台技术发展时间短、起步晚，通过对比还是可以发现我国转台技术在精度、动态性能、控制技术等方面与美国等发达国家还是存在差距的。

1.3 伺服系统

伺服系统是指在控制信号的要求下，执行机构执行一系列特定的动作^[9]。其主要任务就是按照控制信号的命令要求，通过将信号进行功率放大等操作，可以快速控制电机等驱动结构的速度、位置、扭矩等^[10]。

一般认为伺服系统是由液压技术逐渐发展到电气技术的，其中电气伺服技术的发展与伺服电机的发展息息相关，总结伺服电机 50 多年的发展历史，可将其分为三个阶段：

1960 年以前：此阶段伺服系统大多为开环系统，原动件多为步进电机，例如以步进电机为驱动的液压伺服马达。液压伺服系统结构简单、工作稳定、控制方便、扭矩大并且可保持输出值恒定^[11]。

1960 年到 1980 年：在这个时间段内，伺服电机开始逐渐进入伺服控制领域并得到迅速发展，伺服系统也逐渐抛弃开环系统转而更多地采用闭环系统。由于直流电机在调速方面具有很大优势，因此被很多高性能驱动装置采用^[12]。但是，直流伺服电机具有易发热、结构复杂、精度易受环境影响等缺点，所以无法满足伺服控制系统日渐严格的要求。

1980 年至今：随着机电一体化的发展需求，并且伴随着控制技术、伺服电机结构及先进材料和半导体技术的发展，出现了无刷交流伺服电机等一系列新型电机^[13]。

中国在转台伺服技术方面的研究主要包括：

1、运动仿真和惯导测试方面，对伺服技术的指标有较高要求。其中可以将精度控制在 $\pm 2'' \sim \pm 30''$ 范围内的单轴、双轴、三轴伺服转台由中航 303 所研制，主要目的是将伺服转台用于惯导测试和运动仿真。在这一系列转台中尤其是可以将转台精度控制在 $\pm 2''$ 的 TDC-2 型陀螺动态参数测试系统的转台性能最为突出。此外还有航天一院 102 所研制的位置分辨率达到 0.005 的 DSW-O1 单轴速率位置转台，以及中船 6354 所的 ST-160，ST-380 型单轴位置转台^[14]。

2、对数控机床的伺服转台的研制。

3、对雷达伺服转台的研究^[15]，如航天二院 203 所研制的计算机控制的转台装置，东南大学的《EMC 自动测试用转台和天线塔》，北京友信科技集团的 URT-L-O1 雷达仿真转台等。

由于直流伺服电机具有换向器、电刷等机械部件，而交流电机不仅克服了这些缺点，还具有转动惯量低和过载能力强等优点，因此交流伺服电机逐渐取代直流伺服电机^[16]。并且交流伺服系统通过使用以微处理器为基础的系统级芯片及智能化功率器件，可以抑制非线性等不确定因素，同时可以有效的避免模型参数变化对系统的影响，从而提高了系统的性能，成功实现了高精度伺服控制系统^[17]。

1.4 课题主要研究内容

本课题所设计内容，以图像光谱分析仪中的二维伺服跟踪转台为背景，对其机械结构和伺服系统进行总体设计，并在设计完成后以实验结果为依据，论证整台设备的跟踪性能。本文完成了二维转台的机械结构设计加工，CANPCI 通讯卡、驱动器、交流伺服电机等部件的选型，以及硬件调试，最后通过仿真实验和外场实验整定 PID 参数，并编写运动控制程序，方便二次开发。工作总结如下：

1. 确定机械结构，为保证控制精度和减小结构体积，本文采用双直驱技术，利用电机直接驱动相应结构，实现二维跟踪。
2. 制定控制方案，完成各主要部件的选型。最终，我们选定日本哈默纳科 FHA-C mini 系列谐波减速电机和美国 COPLEY 公司的 ACJ 系列驱动器及 CAN 通讯卡。
3. 整体二维转台搭建，完成电机、驱动器等部件的接线，并进行硬件调试，优化电机电流环、速度环和位置环的 PID 参数。
4. 编写跟踪控制程序和上位机软件，封装成接口函数形式，方便二次开发。
5. 利用仿真实验验证跟踪程序和运动控制程序，以及整台设备可以正常运转并优化跟踪 PID 控制器参数。利用外场实验，验证控制理论以及整台设备的跟踪理论正确可行，并通过实验不断优化跟踪 PID 控制器参数。

论文结构主要依据整台设备设计加工及后续伺服系统搭建和实验顺序为依据安排，提出一套以 COPLEY 驱动器为核心，以哈默纳科伺服电机为被控对象的二维伺服跟踪转台的完整方案。其中：

第一章：陈述了国内外转台的发展和现状以及二维跟踪转台在军事等领域的主要运用，对伺服系统进行简介，进而提出本文主要研究内容。

第二章：通过分析二维转台机械及伺服部分的工作原理，进而提出转台的整体方案、技术要求以及机械结构设计。并在实现机械结构框架后，完成主要部件 CANopen 通讯卡、伺服驱动器和电机的选型。在整体设备搭建完后，研究个部件之间的通讯方式，并利用调试软件，调试验证整台设备的可行性。

第三章：在完成整体设备搭建和调试后，利用 VC6.0 编写电机控制程序及转台跟踪程序，并封装成接口函数形式，方便二次开发。

第四章：主要介绍仿真实验和外场实验。仿真实验主要通过模拟目标飞机以零、低、中、高速度飞行，控制整台设备跟踪模拟目标，验证整台设备的可

行性，及调节设备的各个参数，优化整体设备。外场实验，主要通过跟踪真实目标飞机完成整台设备在实时环境下的跟踪效果，同时优化 PID 跟踪参数。

在论文最后对所完成工作做总结，并展望后续转台控制的优化工作。

厦门大学博硕士论文摘要库

第二章 总体设计

2.1 系统总体方案

2.1.1 技术要求

2.1.1.1 一般特性

表 2-1：一般特性

承载能力	1KG
负载镜片尺寸	220mm×150mm
转台质量	5KG
转角范围	水平正负 5 度，俯仰正负 5 度
工作方式	位置模式
计算机系统	通用

2.1.1.2 性能指标

表 2-2：性能指标

	X 轴	Y 轴
最大角速度	10°/s	15°/s
最大角加速度	100°/s ²	100°/s ²
位置精度	5.4 秒	5.4 秒
速率范围	0-10°/s	0-15°/s
摇摆状态	水平旋转	垂直俯仰

2.1.2 整体方案

本文所设计二维转台如图 2-1 与图 2-2 所示，主要用于一台对飞机、导弹尾焰的中波红外光谱分析技术和长波红外成像双波段结合的红外光谱仪，它通过图像处理追踪可疑目标，并通过探测器采集中波红外光谱^[18]。此二维转台将根据这台仪器中的图像处理部分所提供的坐标数据，建立地球坐标系，借由跟踪控制程序进行俯仰和水平运动，进而实现对目标的跟踪，跟踪过程中图像视场的十字准心始终围绕在目标飞机周围，并通过二维转台中的反射镜，将目标飞机的光谱反射到整台图像光谱仪的光谱分析部分，进而分析该目标的光谱数

据。并且可以根据目标距离修改跟踪参数，方便优化控制跟踪效果，所以要求此二维转台具有更优秀的机械结构、动态性能、以及方便简洁高效并可进行二次开发的控制软件。

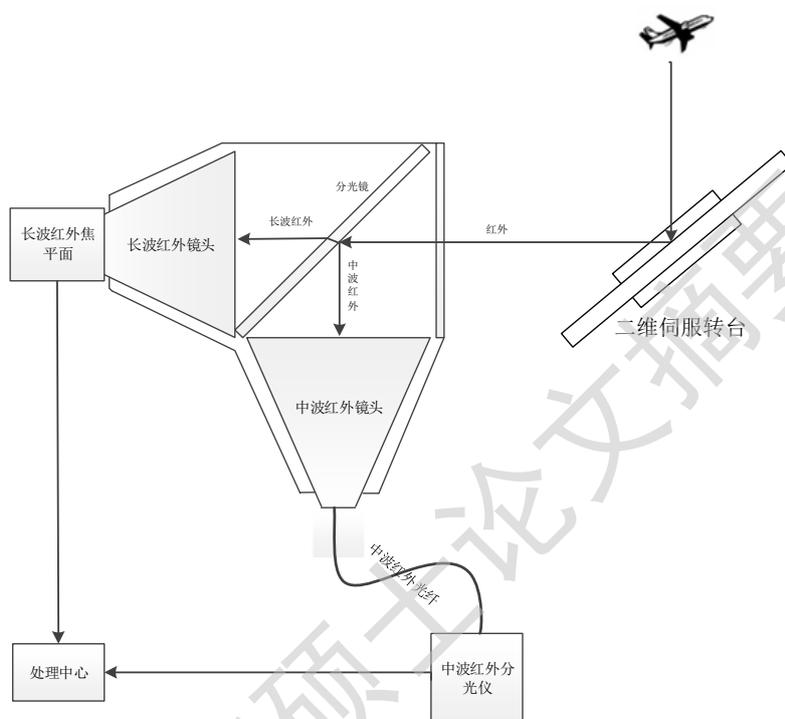


图 2-1 二维转台在整体设备中作用示意图

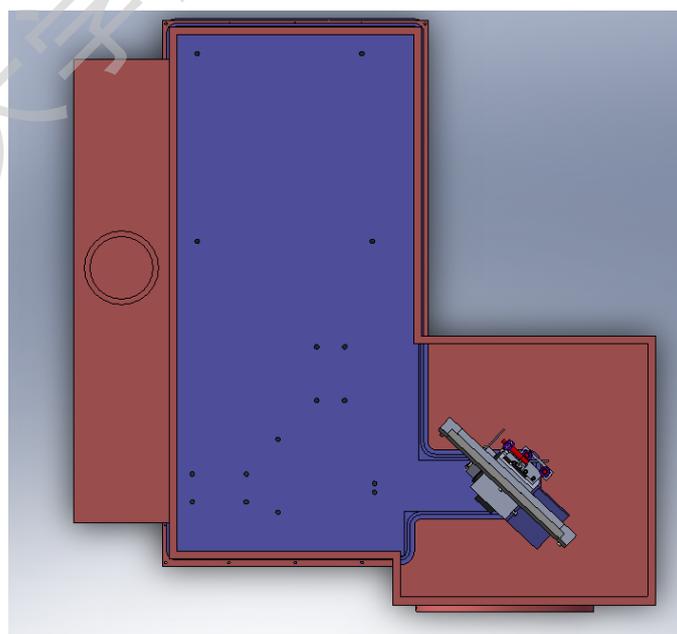


图 2-2 二维转台在整体设备中安装示意图

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.