



测绘地理信息科技出版资金资助  
CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

现代测绘理论与技术丛书

# 激光跟踪仪测量 原理与应用

范百兴 李广云 易旺民 杨振 著



The Measurement Principle and  
Application of Laser Tracker



测绘出版社

现代测绘理论与技术丛书  
测绘地理信息科技出版资金资助

# 激光跟踪仪测量原理与应用

The Measurement Principle and Application of Laser Tracker

范百兴 李广云 易旺民 杨振 著



测绘出版社

·北京·

© 范百兴 2017

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

## 内容简介

本书首先介绍了激光跟踪仪基本概念及其发展状况,深入分析了单台激光跟踪仪测量与跟踪控制原理,并对国内外现行的激光跟踪仪检定与校准方法进行了介绍。在此基础上,重点研究了激光跟踪仪多站数据处理模型、广义 USMN 平差模型和空间三维控制网建立模型,很好地解决了激光跟踪仪静态三维坐标测量和空间控制网布设问题。最后进一步分析了单台及多台激光跟踪仪动态位姿测量原理和数据处理方法,对激光跟踪仪联机测量技术及测量软件进行了介绍,并结合实际工程背景,介绍了激光跟踪仪测量技术的典型工程应用。

本书理论和工程实践紧密结合,可以作为高等院校精密工程测量、计量科学与技术、精密仪器等专业的本科及研究生教学和参考用书,也可以作为相关领域工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

激光跟踪仪测量原理与应用/范百兴等著. — 北京:测绘出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5030-4030-6

I. ①激… II. ①范… III. ①激光跟踪②激光测量仪  
IV. ①TN249②TN761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 322990 号

责任编辑	雷秀丽	执行编辑	侯杨杨	封面设计	李伟
责任校对	孙立新	责任印制	陈超		
出版发行	测绘出版社	电 话	010-83543956(发行部)		
社 址	北京市西城区三里河路 50 号		010-68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010-68531363(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司	经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm				
印 张	10.5	字 数	205 千字		
版 次	2017 年 6 月第 1 版	印 次	2017 年 6 月第 1 次印刷		
印 数	0001-1000	定 价	52.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-4030-6

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

# 前 言

激光跟踪仪测量系统是精密工业与工程测量的重要技术手段,具有测量精度高、测量范围大、自动化程度高等优点,自 20 世纪 90 年代产生以来,在航空航天、机械制造与安装、设备检测、计量检定等领域都得到了广泛的应用。

激光跟踪仪在测量中经常遇到需要进行位置和姿态测量误差分析、校准检定、坐标系转换、多站测量数据拼接、测量数据平差、多台同步动态测量等问题。本书从上述理论和技术问题出发,围绕激光跟踪仪测量系统的原理、方法、数据处理模型和应用进行研究。全书共分 8 章,各章主要内容安排如下:

第 1 章从激光跟踪仪测量系统的概念和特点、激光跟踪仪测量系统的分类及展望等方面进行介绍,并对全书的主要内容进行了介绍。

第 2 章介绍了激光跟踪仪测量系统的 IFM 测距、ADM 测距和角度测量原理,并对激光跟踪仪的 PSD 和 ATR 跟踪控制原理进行了详细讲述。在此基础上,对激光跟踪仪空间三维坐标和空间六自由度测量原理进行了介绍。

第 3 章从激光跟踪仪的测角、测距和轴系结构出发,详细分析了测角误差和测距误差的组成,并根据测角和测距误差,对三维坐标测量误差进行了公式推导和计算。

第 4 章主要介绍了激光跟踪仪的检定与校准原理和方法,分为现场校准、经典校准和三维坐标检定等三部分内容。三维坐标检定主要依据 ASME B89、JJF1242 等现有国内外的检定和校准规程。

第 5 章讨论了激光跟踪仪多站数据处理模型和基于激光跟踪仪的广义 USMN 平差模型,重点阐述了激光跟踪仪多站三维边角网平差、三维测边网平差模型和广义 USMN 平差模型,并附有解算案例。

第 6 章讨论了激光跟踪仪动态位置和姿态测量的原理和方法。主要包括激光跟踪仪动态测量校准与测试、多站时间同步技术和多站空间位姿测量等内容,并结合激光跟踪仪动态测量的特点,提出了激光跟踪仪动态测量数据处理的相关方法。

第 7 章主要介绍了目前市场上主要的激光跟踪仪的联机测量和解算软件,并针对徕卡系列和 API 系列激光跟踪仪的二次开发进行了详细的讲述。

第 8 章主要介绍了激光跟踪仪测量系统的典型工程应用,从工程背景、测量方法、测量结果等方面,对航天器、雷达天线、产品安装与检测、高能粒子加速器和水电设备测量等工程案例进行了详细描述。

本书由范百兴统稿。其中,第 3、第 5、第 6 和第 8 章部分内容由范百兴编写,

第1、第2章由李广云编写,易旺民编写了第3、第8章部分内容,第7章和第8章部分内容由杨振编写。杨凡博士参与了书中部分实验和应用项目的研究工作。本书受到国家自然科学基金项目(编号41101446)的支持,主要收录了作者多年来围绕激光跟踪仪测量技术展开理论和技术应用研究所取得的成果,同时参考、借用了国内外许多同行专家的研究成果,并得到了激光跟踪仪制造厂商的支持,作者在此对他们一并表示衷心感谢!

本书在出版过程中,得到了信息工程大学地理空间信息学院的大力支持,测绘出版社为本书的出版做了大量辛苦细致的工作,作者在此致以深深的谢意!

虽然力求完美,但由于作者水平有限,本书还会存在不足之处。恳请各位读者批评、指正,作者的电子邮箱是 [fbxhrhr@sina.com](mailto:fbxhrhr@sina.com)。

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 激光跟踪仪概述	1
1.2 激光跟踪仪测量系统的组成	4
1.3 基于激光跟踪仪的空间坐标测量技术研究现状	10
第 2 章 激光跟踪仪测量原理	13
2.1 干涉法测距原理	13
2.2 绝对测距模式原理	15
2.3 激光跟踪仪测角原理	17
2.4 激光跟踪仪控制原理	19
2.5 空间位置和姿态测量原理	21
第 3 章 激光跟踪仪测量误差分析	26
3.1 激光跟踪仪测角误差	26
3.2 激光跟踪仪测距误差	28
3.3 三维坐标测量误差	31
第 4 章 激光跟踪仪检定与校准	33
4.1 现场校准原理与方法	33
4.2 测角测距经典校准方法	35
4.3 三维坐标检定方法	43
第 5 章 激光跟踪仪多站数据处理	54
5.1 多站三维边角网平差	54
5.2 整平状态的多站平差	59
5.3 多站三维测边网平差	62
5.4 基于激光跟踪仪的 USMN 平差	74
5.5 广义 USMN 解算精度分析	81

---

<b>第 6 章 激光跟踪仪动态测量</b> .....	85
6.1 激光跟踪仪动态校准与测试 .....	85
6.2 多站时间同步技术 .....	89
6.3 动态测量数据处理 .....	98
6.4 多台跟踪仪动态位置和姿态测量 .....	103
<b>第 7 章 激光跟踪仪软件及二次开发</b> .....	107
7.1 激光跟踪仪软件 .....	107
7.2 跟踪仪二次开发 .....	114
<b>第 8 章 激光跟踪仪典型应用</b> .....	117
8.1 大型复杂航天器测量 .....	117
8.2 大型雷达天线精密测量与检测 .....	119
8.3 大型重工业产品安装与检测 .....	126
8.4 大型不锈冷轧带钢轧钢辊系安装检测 .....	131
8.5 高能粒子加速器准直测量 .....	137
8.6 大型水电设备测量 .....	148
8.7 武器装备定向测量 .....	151
<b>参考文献</b> .....	158

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Introduction of Laser Tracker .....	1
1.2 Configuration of Laser Tracker Measurement System .....	4
1.3 The Research Present of Laser Tracker Spatial Coordinate Measuring .....	10
<b>Chapter 2 The Measurement Principle of Laser Tracker</b> .....	13
2.1 The Ranging Principle of IFM .....	13
2.2 The Ranging Principle of ADM .....	15
2.3 The Angular Measurement Principle of Laser Tracker .....	17
2.4 The Control and Tracking Principle of Laser Tracker .....	19
2.5 The 3D/6D Surveying Principle of Laser Tracker .....	21
<b>Chapter 3 The Measurement Error Analysis of Laser Tracker</b> .....	26
3.1 The Angular Measurement Error Analysis of Laser Tracker .....	26
3.2 The Ranging Error Analysis of Laser Tracker .....	28
3.3 The 3D Coordinates Error Analysis of Laser Tracker .....	31
<b>Chapter 4 The Checking and Calibration of Laser Tracker</b> .....	33
4.1 The Principle and Method of Field Checking .....	33
4.2 The Classical Calibration Method of Laser Tracker .....	35
4.3 The Coordinates Calibration Method of Laser Tracker .....	43
<b>Chapter 5 The Combined Adjustment Solution of Multi-station Laser Tracker</b> .....	54
5.1 The 3D Side-angle Measurement Network Adjustment of Multi-station .....	54
5.2 The Multi-station Adjustment with Leveling .....	59
5.3 The 3D Trilateration Network Adjustment of Multi-station .....	62



5.4	The USMN Adjustment Based on Laser Tracker .....	74
5.5	The Error Analysis of Generalized USMN Adjustment .....	81
<b>Chapter 6</b>	<b>The Kinematic Survey Technology of Laser Tracker .....</b>	<b>85</b>
6.1	The Kinematic Calibration and Testing of Laser Tracker .....	85
6.2	Time Synchronization of Multi-station Laser Tracker .....	89
6.3	The Kinematic Data Processing of Laser Tracker .....	98
6.4	The Kinematic Position and Orientation Measurement of Multi-station .....	103
<b>Chapter 7</b>	<b>The Software and Online Control Technology of Laser Tracker .....</b>	<b>107</b>
7.1	The Main Software of Laser Tracker .....	107
7.2	The Online Control Technology of Laser Tracker .....	114
<b>Chapter 8</b>	<b>The Typical Application of Laser Tracker .....</b>	<b>117</b>
8.1	Large-scale Complicated Spacecraft Measuring .....	117
8.2	Large-scale Radar Antenna Measuring and Checking .....	119
8.3	Large-scale Industry Products Installing and Checking .....	126
8.4	Large-scale DRAP Installing and Checking .....	131
8.5	High Energy Accelerator Alignment Measuring .....	137
8.6	Large-scale Hydro-power Equipment Installing and Measuring ...	148
8.7	Orientation Surveying of Weaponry .....	151
<b>References</b>	<b>.....</b>	<b>158</b>

# 第1章 绪 论

本章首先介绍激光跟踪仪的基本概念及其发展过程,对目前常用激光跟踪仪的指标参数进行归纳总结,然后分析激光跟踪仪在大尺寸空间坐标测量中的优势,以及详细介绍激光跟踪仪主机和附件的组成及其特点,最后介绍国内外的发展现状。

## 1.1 激光跟踪仪概述

在精密工业与工程测量领域,空间点三维坐标的精密测量始终是一个重要的任务,而精密测距技术是实现三维点坐标精密测量的重要前提。为了解决精密测距问题,人们先后研发了因瓦带尺、光波测距、微波测距等精密测距技术,而激光精密测距技术的发展,使精密测距技术和测量精度得到了前所未有的提高。

激光测距技术始于20世纪60年代,其后激光测距技术便迅速应用于激光红外测距,该技术使激光测距仪器的体积减小,测程可达几千米至十几千米,测距精度达到毫米级。测距原理主要分为脉冲法测距和相位法测距。

脉冲法测距是直接测定脉冲信号在发射中心到反射中心的传播时间 $t$ ,然后乘以脉冲信号在空气中的传播速度,即可得到发射中心到反射中心的距离。由于激光脉冲的能量比较集中,因此,脉冲法测距可以实现无合作反射目标的距离测量,并且测程很远。目前,激光测月(约38.4万千米)、激光测卫(几千千米)等远程测距都采用脉冲法测距,而全站仪无合作目标测距、激光扫描测距、手持测距仪等也均为脉冲法测距。脉冲法测距的精度一般较低,但在采用细分脉冲测量技术后,测距精度可以大幅度提高,如DI3000脉冲法测距仪测距精度可以达到 $\pm(5\text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times D)$ ,在常规工程测量中有着广泛应用。

相位法测距则是测量正弦信号在测量距离上所产生的相位差来计算距离的,通过提高测相分辨率、增加测距频率等技术,可以大幅度提高测距的分辨率和测距精度,其测量范围一般可以达到几千米到几十千米。目前大多数全站仪、测距仪等均采用相位法测距,如TM30全站仪的相位法距离测量精度可以达到 $\pm(0.6\text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times D)$ ,测程可以达到3500 m(单棱镜),而AT401、 $\mu$ -Base等仪器在80 m内,测距精度优于 $\pm 10\ \mu\text{m}$ (范百兴,2013)。

激光干涉测距技术使测距精度得到了空前的提高,该技术充分利用激光辐射优良的空间相干性、时间相干性以及极高的亮度,常采用稳频氦氖激光为光源构成具有干涉功能的测量系统。目前,激光干涉测距主要分为单频激光干涉仪和双频

激光干涉仪。

激光精密测距技术,尤其是在激光干涉测距技术快速发展和广泛应用的基础上,结合精密角度测量技术,产生了精密测量仪器——激光跟踪仪。

20世纪80年代末90年代初,国际著名军事航天器生产公司BAE寻求合作伙伴,要求研发一套测量系统,不仅能提高航天器零部件的拼接精度,而且降低对测量工作者的要求以及劳动强度。瑞士徕卡公司与其合作,于1990年开发出世界上第一台激光跟踪仪SMART310,并推出第一代产品SMART310,硬件采用美国专利生产的激光跟踪仪,软件是在DOS下开发完成的专用测量软件。1993年又推出了SMART310的第二代产品,1996年推出了LT500/LTD500,其中LTD500采用了徕卡专利的高精度绝对测距技术(absolute distance meter, ADM),解决了在干涉法测距模式下,断光后需要重新回鸟巢的缺点。测量速度更快、更为方便。而激光跟踪仪的软件采用徕卡统一工业测量系统平台Axyz/LTM,软件界面较SMART310友好,功能更多,操作更为方便。由于激光跟踪测量系统的快速、动态、高精度的特点,已被广泛应用于航天、航空、汽车、造船、机械制造、核工业等精密工业测量领域。此后,徕卡公司相继推出了AT901系列、AT401/402、AT930/960等激光跟踪仪。

此外,法如公司推出了X系列和LT+X系列产品,具有精度高、结构坚固、适用于恶劣条件下的测量任务等特点,其独特的XtremeADM超级绝对测量技术精度比原ADM技术提高了两倍。自校准技术使仪器可以快速完成高精度校准。

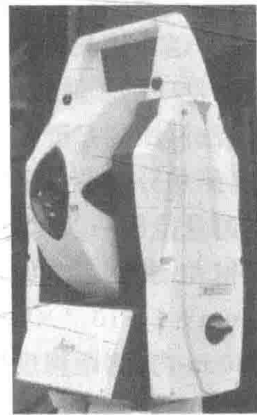
美国自动精密工程公司(Automatic Precision Industry, API)先后推出了Traker II、Tracker III和Radian等类型的激光跟踪仪,该系列产品以其轻巧和便携等优点,在工业制造等领域得到广泛应用。常见激光跟踪仪的外形和主要参数分别见图1.1和表1.1。



(a) LTD500激光跟踪仪

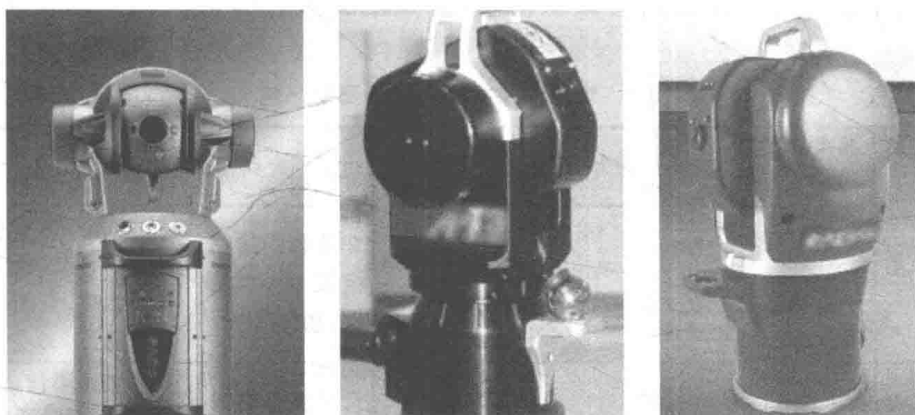


(b) AT901激光跟踪仪



(c) AT402激光跟踪仪

图 1.1 几种常见的激光跟踪仪



(d) 法如ION激光跟踪仪 (e) API T3激光跟踪仪 (f) API Radian激光跟踪仪

图 1.1(续) 几种常见的激光跟踪仪

表 1.1 常见激光跟踪仪的主要技术参数

仪器型号	徕卡 AT901	徕卡 AT402	API T3	API Radian	法如 ION
主机尺寸/mm	240×290×620	221×188×290	190×190×360	177×177×360	311×311×556
控制器尺寸/mm	510×485×200	250×112×63	315×250×100	310×160×110	282×158×214
主机质量/kg	22	7.3	8.5	9	17.7
控制器质量/kg	17	0.8	4	3.2	5.2
水平范围/(°)	±360	±360	±320	±320	±270
垂直范围/(°)	-45~+45	-45~+45	-60~+80	-59~+79	+75~-50
横向跟踪速度/(m/s)	4	3	4	4	—
径向跟踪速度/(m/s)	6	3	6	6	4
测角分辨率/(°)	0.14	0.07	0.05	0.018	—
测角重复性	7.5 μm+3 μm/m	7.5 μm+3 μm/m	—	—	10 μm+2.5 μm/m
全量程测角精度	±(15 μm+6 μm/m)	±(15 μm+6 μm/m)	—	±3.5 μm/m	—
ADM测距波长/nm	795	780	—	—	—
ADM分辨率/μm	0.1	0.1	1.0	0.1	0.5
ADM精度	10 μm	10 μm(MPE)	1.5 μm/m	10 μm	8 μm+0.4 μm/m
ADM测量范围/m	1~80	160	60	50	—
IFM波长/nm	633	—	—	—	—
IFM分辨率/μm	0.32	—	0.1	0.08	0.158
IFM精度	±0.5×10 <sup>-6</sup>	—	±0.5×10 <sup>-6</sup>	±0.5×10 <sup>-6</sup>	±(2 μm+0.4 μm/m)
IFM测量范围/m	0~40	—	60	50	—
全量程点位精度	±(15 μm+6 μm/m)	±(15 μm+6 μm/m)	±5 μm/m	±10 μm或±5×10 <sup>-6</sup>	±0.049 mm
点位重复性	—	—	2.5 μm/m	—	—
测量速度/(点/s)	3 000	—	3 000	—	—
工作温度/°C	0~40	0~40	-10~45	-10~45	-15~50

注:表中 IFM 为干涉法测距;ADM 为绝对测距模式。

激光跟踪仪在我国的应用始于 1996 年。沈阳飞机工业(集团)有限公司在国内首次引进了 LTD500 激光跟踪测量系统用于飞机的装配测量,在航空航天、机械加工制造、大型设备精密安装、计量检定等领域得到了广泛应用。目前,中科院等单位也在积极研制国产的激光跟踪仪。

激光跟踪仪与各种工业测量系统相比,其主要参数的比较和分析如表 1.2 所示。

表 1.2 常见大尺寸空间坐标测量系统

类型	典型测量范围	典型点位精度	空间坐标测量原理	优点	缺点
经纬仪测量系统	$\leq 20$ m	$\pm 0.05$ mm/5m $\pm 0.1$ mm/10 m	空间角度前方交会	非接触测量,测量范围大,便携性好,功能强大	系统复杂,与观测水平有关,受交会角影响,自动化程度低
全站仪测量系统	$\leq 120$ m	$\pm 0.5$ mm/30 m	球坐标测量	无交会角影响,测量范围大	接触式测量,精度较低,自动化程度较低
激光跟踪仪测量系统	$\leq 80$ m	$\pm 0.25$ mm/40 m	球坐标测量	无交会角影响,测量范围大,精度高,动态性能好	接触式测量,受环境影响较大
数字摄影测量系统	$\leq 10$ m	$\pm 0.1$ mm/10 m	空间像片交会	便携性好,精度高,点批量测量,非接触测量	单像片测量范围小,受环境影响较大
激光雷达测量系统	$\leq 24$ m	$\pm 16$ $\mu$ m/1 m $\pm 241$ $\mu$ m/24m	球坐标测量	点云测量,速度快,非接触测量	受测量物体影响较大,无法单点测量
iGPS 测量系统	$\leq 40$ m	$\pm 0.12$ mm /10 m	空间角度前方交会	多任务测量,测量速度快	受交会角度影响,发射器稳定性要求高,接触式测量
关节臂测量系统	$\leq 5$ m	$\pm 0.25$ mm/5 m	空间支导线	便携性好,不需要通视,测量灵活	测量范围小,接触式测量

从表 1.2 中可以看出,综合测量距离和测量精度等指标,激光跟踪仪具有明显优势。从表 1.1 和表 1.2 中可以发现,激光跟踪仪的角度测量误差是影响点位误差的主要因素,以 AT901-B 型激光跟踪仪为例,其标称测角精度为  $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m} \cdot D)$ ,IFM 测距精度为  $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ ,而点位标称精度也为  $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m} \cdot D)$ ,因此,IFM 测距误差对点位误差的影响在较短距离范围内可以忽略不计,点位误差主要由测角误差引起。

## 1.2 激光跟踪仪测量系统的组成

### 1.2.1 激光跟踪仪主机组成

激光跟踪仪测量系统主要包括主机、附件和软件等三部分(李广云等,2011)。

激光跟踪仪主机主要包括角度测量模块、距离测量模块、跟踪控制模块、反射器、脚架、数据处理终端,如图 1.2 所示。

### 1. 角度测量模块

角度测量模块主要包括水平编码度盘和垂直编码度盘、驱动马达和读数系统等。目前,最高的测角采样率(数据采集速度)可达到 3 000 点/s,角度分辨率为 0.14",角度测量重复性精度为  $\pm(7.5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m} \cdot D)$ ,测角精度为  $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m} \cdot D)$ (Leica Geosystem AG, 2008)。

### 2. 距离测量模块

距离测量模块包括两个部分:IFM 测距模块和 ADM 测距模块。

### 3. 跟踪控制模块

跟踪控制模块包括位置探测器、驱动马达、电路控制系统和反馈光路等部分。徕卡跟踪仪的最大横向跟踪速度为 4 m/s,径向跟踪速度为 6 m/s,美国自动精密工程公司(API)生产的激光跟踪仪的最大跟踪速度为 3 m/s,最大加速度为 2 g。

## 1.2.2 激光跟踪仪测量反射器

激光跟踪仪反射器为球形反射器,从大小上分为 3.81 cm 和 1.27 cm 两种类型。从功能上分类,一般有猫眼反射器(CER)、角隅反射器(CCR)和工具球反射器(TBR)等,如图 1.3 所示。

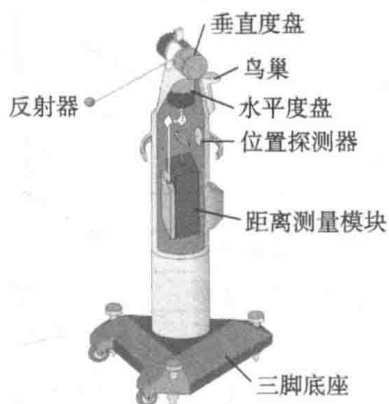
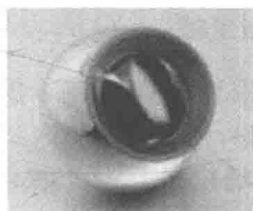
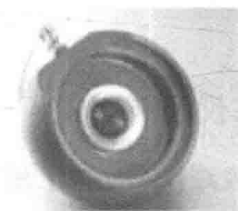


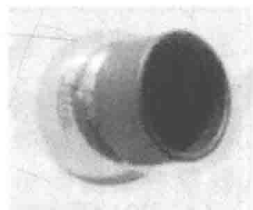
图 1.2 激光跟踪仪系统结构



(a) 红环反射器



(b) 猫眼反射器



(c) 工具球反射器



(d) 抗摔反射器

图 1.3 激光跟踪仪反射器

反射器采用球型结构,内部嵌入一个空心的角锥棱镜,测量容许误差一般不超过 $\pm(0.010\text{ mm}\sim 0.025\text{ mm})$ (Leica Geosystem AG,2010),表 1.3 总结了常见的几类反射器技术指标。

表 1.3 激光跟踪仪反射器类型及参数指标

名称	测角范围	球半径	光学中心偏差	球形度偏差
角隅反射器	30°	6.35 mm	<0.006 mm	<0.0015 mm
红环反射器		19.05 mm		
工具球反射器	22°(有圆环) 50°(无圆环)	6.35 mm	<0.01 mm	<0.003 mm
固定安装反射器	50°	6.35mm	<0.01mm	<0.003mm
猫眼反射器	60°	6.35 mm 19.05 mm	<0.01 mm	<0.01 mm
抗率反射器	30°	6.35 mm 19.05 mm	<0.01 mm	<0.001 5 mm

除上述常见的反射棱镜外,激光跟踪仪还配备了一些专用测量的特殊反射靶标,如镜面反射器等,如图 1.4 所示。



图 1.4 镜面反射器

### 1.2.3 激光跟踪仪校准工具

各类型的激光跟踪仪都配备了相关的现场校准工具,以徕卡 AT901 系列激光跟踪仪测量系统为例,其校准工具如图 1.5 所示。

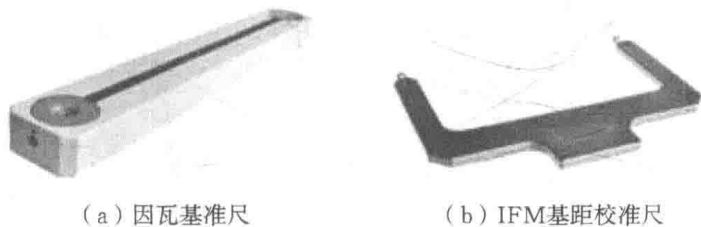
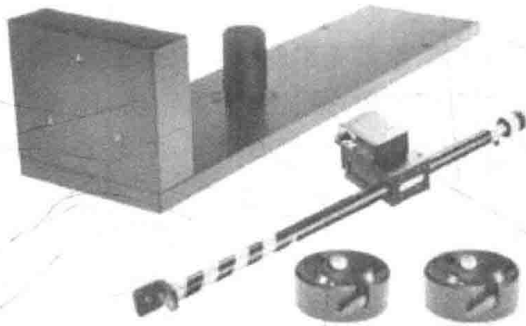


图 1.5 激光跟踪仪校准工具



(c) 球杆校准器

图 1.5(续) 激光跟踪仪校准工具

### 1. 因瓦基准尺

因瓦基准尺用来对激光跟踪仪的现场距离测量值进行校准,常见长度为 1.2 m 或 1.5 m,材料主要为膨胀系数较小的碳纤维或殷钢。由于碳纤维材质较轻,因此在使用时需要采取固定措施,以防止靶标球的放置和盈动引起基准尺微动。

### 2. IFM 基距校准尺

主要用来重新校准鸟巢到仪器中心的基准距离值,近似 U 型,主要采用 1.5" 的角隅反射器和工具球反射器。

### 3. 球杆校准器

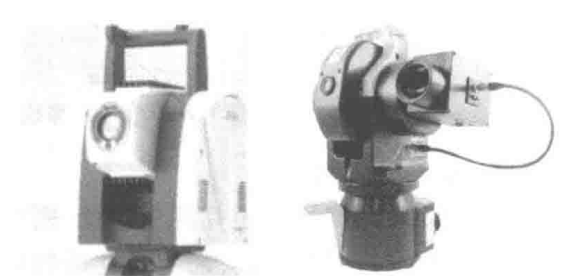
精密球杆通过固定装置可以稳定地安装在工业测量三脚架上,接通电源后在马达驱动下可以进行旋转。靶标球固定在球杆的一端,旋转时在空间形成一个标准圆轨迹,依次校准激光跟踪仪动态测量的相关参数。

## 1.2.4 激光跟踪仪测量工具

结合工业测量的需求,各个激光跟踪仪厂商都推出了功能强大的测量工具,这些测量工具扩展激光跟踪仪的功能,极大地丰富了激光跟踪仪的测量功能,拓展了激光跟踪仪的应用范围。

### 1. 高精度图像传感器

激光跟踪仪只能测量空间点的三维坐标值,要想测量空间目标的姿态,增加高精度图像传感器可以实时测量得到空间物体的姿态,各类型的激光跟踪仪都配备了高精度图像传感器。其中 API 系列激光跟踪仪采用内置图像传感器,徕卡 LTD/AT901 系列则采用外置图像传感器,如图 1.6 所示。



(a) 徕卡 T-Cam 图像传感器 (b) API 图像传感器

图 1.6 激光跟踪仪高精度图像传感器



## 2. 智能测头

智能测头的基本原理是利用激光跟踪仪获取测头的位置坐标。通过高精度图像传感器获取智能测头的姿态参数,通过坐标系转换,解算得到智能测头末端的三维坐标值。可用于空间姿态测量、隐藏点测量等,如图 1.7 所示。

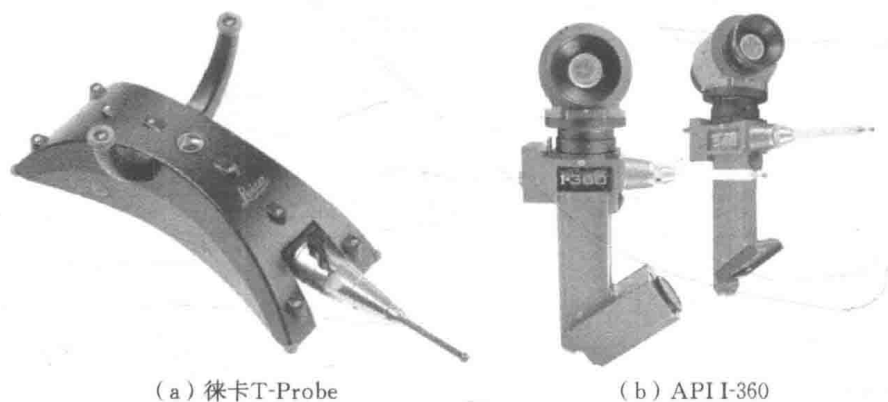


图 1.7 激光跟踪仪智能测头

## 3. 三维点云扫描测头

三维点云扫描测头是利用激光跟踪仪的三维坐标测量和基于图像传感器的三维姿态测量功能,实时获取扫描测头的空间位置和姿态,再配合二维工业激光扫描仪,实时获取测量物体的三维点云数据,如图 1.8 所示。

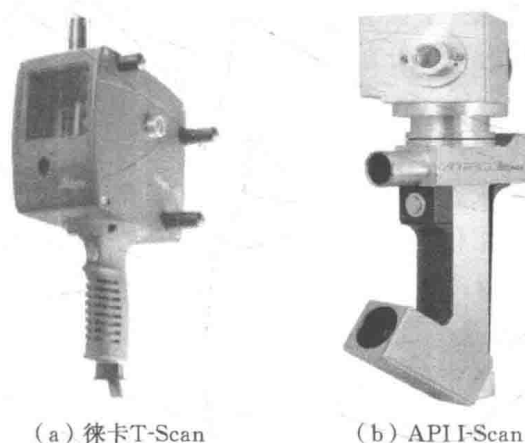


图 1.8 激光跟踪仪三维点云扫描测头

## 4. 主动式靶标

激光跟踪仪属于极坐标测量系统,需要测量棱镜实时对准激光跟踪仪以保证激光能原路返回,但在对姿态有变化的物体进行动态测量时,就无法保证棱镜测量面实时对准激光跟踪仪。为了解决姿态变化较大时的跟踪测量,部分激光跟踪仪配备了主动式靶标(图 1.9),可以根据姿态的变化实时主动调整靶球测量面,以实