

三维控制网技术在BEPC II 储存环中的应用研究*

于成浩^{1;1)} 柯明¹ 杜涵文¹ 殷立新¹ 赵振堂¹ 董岚² 黄开席²

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 介绍了加速器准直测量控制网的特点及BEPC II 储存环的控制网,给出了基于全站仪和激光跟踪仪的三维控制网技术在该工程中的研究和应用情况,联合利用这两种仪器,采用三维测量方式建立了一个高精度的测量控制网,着重分析了三维控制网的优缺点及增加全站仪观测值后对控制网精度的贡献,并指出三维控制网技术具有较好的应用前景.

关键词 三维控制网 加速器准直测量 激光跟踪仪 全站仪

1 引言

粒子加速器是利用磁场约束粒子、用电场对其加速的装置.利用其产生的高速粒子打靶、对撞可以研究微观粒子的各种性能特点;利用接近光速运动的电子沿轨道偏转时产生的辐射可以建造具有卓越性能同步辐射光源,广泛应用于生命科学、材料科学等领域,它是当代前沿学科产生研究成果的一大源泉.

加速器准直测量是研究加速器安装准直的技术,主要理论和方法来自精密工程测量,包括控制网优化设计、仪器操作、数据分析等理论^[1].相对于其他精密工程测量任务,其面临的主要挑战在于:加速器位于狭长的隧道内,尺寸大、非常复杂,定位精度高.目前通常的精度指标为亚毫米级,而新的大型直线对撞机开始向微米量级迈进^[2].

尽管激光波带板、静力水准、引张线等各种新技术是实现更高精度的正确途径,但是,测量控制网却是加速器准直测量工作中不可缺少的一环.通过特定的仪器和方法进行测量、计算,提供在统一的数学坐标系下必要数量和精度的网点,为加速器元件的安装准直及定期监测、调整提供参考基准.

类似于其他的工程任务,加速器测量控制网也分为平面和高程控制网,以水平面为参考,将观测分为水平二维观测和铅垂一维观测,除了可突破测量仪器

的局限性外,还能使计算大大简化.平面控制网的测量仪器为经纬仪、测距仪等边角测量仪器;高程控制网则用水准仪观测.近年来现代测绘技术的发展,使得同时获取平面、高程数据的三维控制网开始广泛应用^[3].

根据控制的范围不同,加速器测量控制网分为整体网和局部网,整体网为整个加速器装置提供控制,确保不同部分的相对位置、姿态的正确;局部网为某部分的加速器元件提供相对位置控制.由于加速器对元件的相对位置误差非常敏感,所以局部网是关注和研究的重点.

加速器控制网的形状随粒子的轨道形式而变化,一般为直线或环形,图1为几种常见的加速器控制网形式.其中大地四边形的图形条件较好,是采用较多的一种形状;而三角形的方案中需测量弦高,通过高精度的弦高值实现非常高的转角精度,这种方案应用也非常广泛,比如北京正负电子对撞机(BEPC)的储存环控制网;单站多点法是在高精度的全站仪出现后的一种方法,可以避免前两种方案设站次数多、工作量大的缺点,减少了设站次数,通过在设站处较多的观测提供多余观测,欧洲同步辐射装置(ESRF)等加速器采用了这种方法.

此外,前面提到的三维控制网也是一种新的形状,其典型特点是控制网点多、测量速度快,是本文要讨

2006-01-24 收稿

* 国家重大科学工程SSRF基金资助

1) E-mail: yuchenghao@sinap.ac.cn

论的重点。

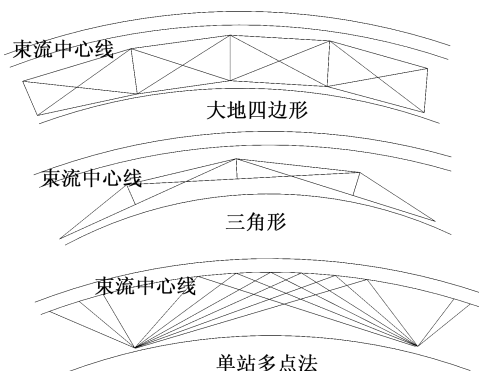


图1 几种常见的加速器局部控制网形式

2 BEPC II 储存环的测量控制网

BEPC II 是 BEPC 的大规模的改造工程, 改造后将对撞亮度提高两个数量级^[4], 其中一个关键改造项是: 在不改变现有隧道空间的条件下, 将储存环由单环改造为双环, 这意味着隧道内的空间非常拥挤, 准直测量的难度增大(如图2所示)。

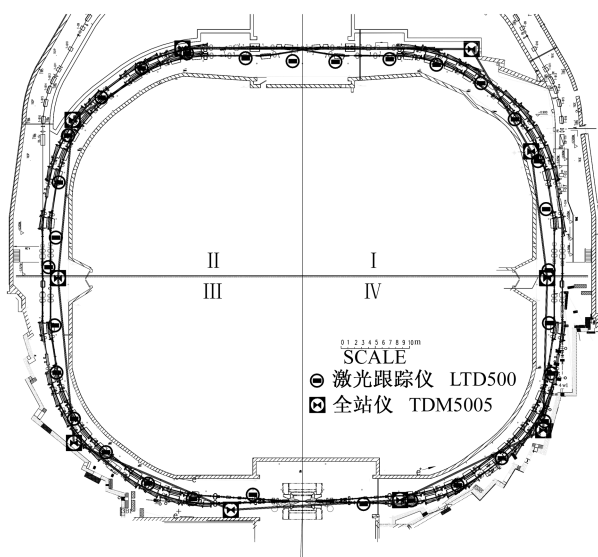


图2 BEPC II 储存环示意图

BEPC 储存环测量控制网为直伸重叠三角锁, 在地面布设了30几个控制点, 在安装时用T3经纬仪测角, Distinvar测距, 偏距仪测弦高^[5]. 由于操作不便, 在运行维护中先后采用过全站仪边角网同测方案、激光跟踪仪测量方案等。

在 BEPC II 的工程建设中, 经过广泛论证及评审, 决定采用激光跟踪仪测量平面坐标, 水准仪测量高程坐标的储存环控制网测量方案, 在精度要求更严格的

对撞区及通视性较好的通道区增加一些全站仪观测. 从激光跟踪仪的测量数据中提取平面数据, 转换为平面距离和角度, 融合全站仪数据进行平面坐标的计算, 而水准仪测量结果直接进行高程坐标的平差计算。

控制网点为锥面结构, 在设计上保证跟踪仪反射球、水准尺的互换性. 网点间隔4m一组, 每组5个点, 分布于内墙、外墙、地面(2个)和天花板, 网点结构及分布示意图如图3所示. 测量仪器分别为 FARO 的 Xi 激光跟踪仪及 LEICA 的 NA2 水准仪, 平差软件为 Survey50 及 NASEW95.

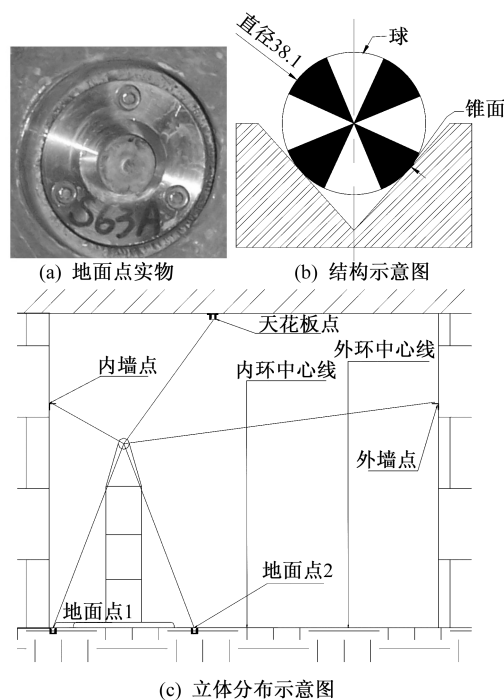


图3 BEPC II 控制网

根据工程进度, 按照设计方案进行了实际观测及平差计算, 取得了令人满意的效果, 已用于现场的安装及放线等工作。

就 BEPC II 储存环控制网来说, 充分发挥了两种仪器的优点, 即激光跟踪仪平面测量精度高、水准仪高程测量精度高的优势, 避免激光跟踪仪在精度上的不足。

但是这种方案没有充分发挥仪器的三维测量功能, 且造成测量人员增加、数据处理工作量增大等问题。

为研究三维测量技术用于精密加速器控制网测量的可行性及精度, 和 BEPC II 正式的储存环控制网测量同步, 用 LEICA 的全站仪 TDM5005 和激光跟踪仪 LTD500 对该控制网进行了独立观测, 下面将介绍这次测量的方案设计及结果。

3 基于全站仪和激光跟踪仪的三维控制网

3.1 三维控制网简介

传统的控制网按平面和高程控制网分别进行处理, 由于平面、高程测量采用不同类型的仪器、不同的操作规程和计算方法, 使得测量步骤比较烦琐, 效率低下, 有时难免对测量精度造成损失. 相对而言, 三维控制网则利用一种测量仪器同时获得三维坐标, 得益于当代先进的测量仪器及软件的发展, 测量效率及测量精度都有明显的提高.

尽管三维控制网的概念很早就提出来了, 真正的实施却是在全站仪、激光跟踪仪等极坐标测量系统出现以后, 同时获得水平角 α 、垂直角 β 、斜距 d , 建立以测站为中心的极坐标系, 可得到三维坐标. 测量时, 通过功能强大的配套软件, 完成控制网的实时数据获取、分析处理.

三维控制网测量过程为: 仪器设站, 测量定向点及非定向点; 移动仪器, 测量定向点及非定向点; 移动仪器, 重复上述步骤, 直至完成整个控制网的测量. 定向点是从其是否参与平差的角度来定义的, 对于大部分控制网点来说, 仅在某些测站是定向点, 在其余测站则是非定向点.

数据处理时, 将每个测站的观测值化为测站坐标系的坐标, 根据不同测站对定向点的坐标, 采取适当的定向方法, 可以将所有的观测点归算到统一的坐标系中. 在定向完成后, 通过平差, 可以得到所有控制网点的三维坐标.

为完成对两测站仪器相对定向所需的 7 个未知数 (3 个位置参数, 3 个旋转参数, 1 个尺度因子) 的解算, 公共点应不少于 3 个 (可提供 9 个观测值). 在实际测量中, 高精度的控制网通常会在相邻测站之间测量 5—15 个公共点, 以提高网的可靠性及精度.

平差一般采用光束法原理, 其名称源于经纬仪、全站仪观测时成束的瞄准 (bundles of pointing)^[6], 通过对多余观测值进行最小二乘处理, 求得最佳的仪器位置和空间姿态及空间点的最佳坐标, 使得观测值改正数的平方和最小. 其误差方程是非线性的, 需要进行多次迭代才能达到最终的要求.

3.2 仪器的选择

全站仪的特点是测角精度高, 测距精度较低. Leica 公司的 TDM(A)5005 工业全站仪^[7], 其标称标准精

度是测角 $0.5''$, 测距 $1\text{mm}+2\times 10^{-6}D$, 在 120m 范围内, 配合高精度的角偶棱镜, 可以达到 0.2mm 的测量精度. 在 20m 范围内, 整个系统的测量精度可达 0.3mm, 这是目前精度最高的全站仪.

激光跟踪仪的特点与全站仪相反, 其斜距通过激光干涉法来测量, 可达几个微米的精度, 而测角精度较低, 约 $2''$. 由于在仪器中有位置敏感探测器 (PSD), 可测出激光束的位置变化量, 通过软件精确计算并反馈给伺服马达控制跟踪头的转动, 从而实现跟踪测量, 使得操作者无需进行烦琐的目标瞄准, 提高了测量的效率和人性化.

以仪器为中心, 对一点进行观测, 激光跟踪仪的不确定度近似为一个圆 (见图 4 右边), 而全站仪的不确定度近似为一个很扁的椭圆 (见图 4 左边), 这是由于其边长与角度测量值精度不匹配造成的^[8]. 由于激光跟踪仪测角精度低, 在视线较长时, 测量结果受外界环境影响较大, 因此特别适合短距离 (20m 以内) 的测量.

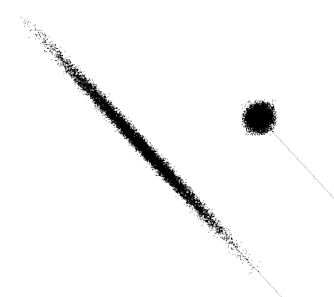


图 4 跟踪仪和全站仪点位误差示意图

尽管高精度的三维控制网测量一般采用激光跟踪仪, 但是基于上述原因, 我们决定采用全站仪和激光跟踪仪进行联合测量, 以发挥全站仪测角精度高、测量距离长及跟踪仪测距精度高的优点, 以期得到一个精度更高的控制网.

3.3 测量过程

在测量时, 隧道现场所有的加速器元件都清理出去了, 通视条件很好. 但是局部的施工还存在, 其产生的振动、噪音对测量可能会造成一定的影响.

两种仪器的设站位置在图 2 中做了标记, 其中激光跟踪仪共有 31 个测站, 全站仪有 10 个测站. 由于光束法平差并不要求精确对中, 所以激光跟踪仪的测站位置是随机的. 但对全站仪来说, 为了验证控制网的精度, 对测站位置进行了固定: 在储存环外环束流轨道附近, 大致均匀布设了 10 个临时点, 以硅胶粘结于地面, 确保在测量过程中稳定. 全站仪观测时通过精

密整平、对中技术保证水平方向和地面点的一致,同时对相邻的两个点进行观测;激光跟踪仪也对这些点进行观测。

为确保可靠性,激光跟踪仪每次设站都测量该站所能看到的所有控制点,由于隧道墙的弯曲,最远距离约24m,每站平均观测35个点。仪器测站间距约6m,即每次跳过一组控制点。由于仪器自动化程度很高,平均每站测量需约半小时。

为发挥全站仪的特点,提高效率,全站仪仅测量6m以外的尽可能远距离的目标,最远距离约47m,平均每站测量34个控制点。为避免照准误差,采用精确照准标志(图3(b))改善瞄准精度,待瞄准后,再更换角偶棱镜,进行边长和方向值的记录。仪器的精确整平、对中及精确瞄准都比较耗时,平均每站需约2h。大部分测站都对标准长度为1554.167mm的碳纤维基准尺进行了测量,以其高精度的长度参考值为依据,作为平差的一个约束条件,对全站仪边长测量值进行修正。

为保证精度,激光跟踪仪在测量现场进行了精确的校准,测量半个环之后,又进行了校准,以削弱搬运造成的仪器精度损失。大部分激光跟踪仪测站也对上述基准尺进行了测量,用于检验仪器的精度。

3.4 平差计算

观测结束后,可利用LEICA的Axyz软件进行平差计算,该软件可同时采集、处理全站仪和激光跟踪仪的数据,平差方式可选择附加约束的解算、忽略各种约束的解算及按自由网平差的方式解算,非常方便。

软件对权的处理规则是:在建立新站时,设定角度、距离测量的标准偏差,根据标准偏差确定测量值的权,每个观测值的权由测站的设置确定,不能被单独改变。在测量时,LTD500采用Leica缺省的精度指标:水平角、垂直角 $2.88''$,测距 0.00254mm ;考虑到瞄准误差的影响,全站仪采用的精度指标为水平角、垂直角 $1''$,距离 0.5mm 。

平差结束后,软件会给出测站参数、每个点的瞄准误差(pointing error,各个观测量和点坐标之间的最大偏差,可用角度或距离方式表示),均方根误差(Root of Mean Square,对观测量偏离其最佳位置的数学统计),交会角,估计点位精度及所有观测值的改正数,可根据这些指标判断粗差、估算精度。

在实际计算时,将激光跟踪仪和全站仪的所有测站进行联合平差,迭代11次,得到联合坐标A、验后

单位权重误差 4.244 及均方根误差 0.38mm 。为了研究全站仪对该网的影响,剔除全站仪测站,仅利用激光跟踪仪的测站进行平差,得到Leica跟踪仪坐标B、重误差 4.6 及均方根误差 0.3mm 。

3.5 结果分析

图5给出了225个控制点按不同测量、平差方法的坐标差值比较。

联合坐标A和Leica跟踪仪坐标B的差值反映了全站仪对控制网的影响,从图5(a)可以看出,水平方向的差值在 $\pm 0.2\text{mm}$,其中 x 和 y 方向的均方根误差分别为 0.05mm 和 0.07mm 。高程方向的差值较大,一般在 $\pm 0.4\text{mm}$ 以内,均方根误差为 0.3mm ,这说明全站仪观测值的存在对高程坐标的改正较大。

设BEPC II的控制网正式坐标(激光跟踪仪平面坐标和水准仪高程坐标)为C。为了正确的比较,首先通过旋转、平移及比例缩放等手段,保证在几套坐标系中,通道两端的S11和S331的坐标完全相等。图5(b)中显示的为Leica跟踪仪坐标B和BEPC II正式成果C的差值,可以看出, y, z 坐标差值较大,二者差别的原因不尽相同。

其中 y 值差别较大的原因在于:坐标变换只顾及 x 轴两端的S11和S331选择比例因子,导致 y 轴两端的控制点 y 值相差 1.7mm ,这个系统性的差值被分布在环型控制网的各个点上,导致了误差绝对值较大。这说明由于选择的观测元素不同,BEPC II正式成果和三维控制网的成果之间存在着一定的尺度误差。

而 z 值差别较大的原因在于:光束法平差受各种影响较大,容易造成误差积累,这个结论也可以通过和Faro跟踪仪转站测量成果的差值验证,限于篇幅,其曲线没有用图形显示,基本形状和图5中的各个曲线类似,最大坐标互差在 2mm 以上。相对而言,传统的水准测量在每个测站都有绝对的铅垂参考方向,误差可以互相抵消。

在图5(c)中,联合坐标A和BEPC II正式成果C的差值曲线和图5(b)中的曲线形状类似,说明全站仪数据对三维控制网的影响是平滑的,没有引起突变。但是,图5(c)中高程方向的偏差程度较小,说明全站仪的数据对高程方向的误差积累起了较好的改善作用。

在图5中,每组数据的差值比较都有一定的跳动,其原因在于图中的数据横坐标为点号,而点号以图3(c)所示的各点为一组按顺序排列,而每组的偏差比较接近。

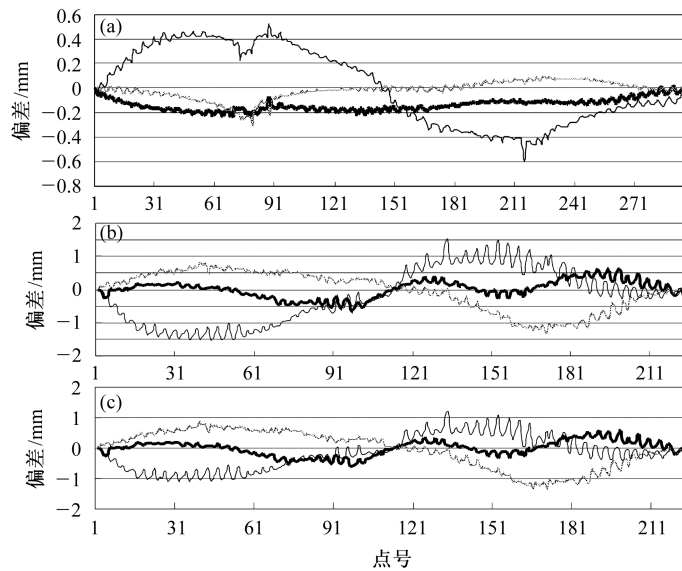


图 5 平差结果比较

(a) 联合坐标 A 和 Leica 跟踪仪坐标 B 的差值比较; (b) Leica 跟踪仪坐标 B 和 BEPC II 正式成果 C 的差值比较; (c) 联合坐标 A 和 BEPC II 正式成果 C 的差值比较; —— Δx , - - - - Δy , — · — Δz .

此外, 如前所述, 全站仪的仪器站点设置了固定标志, 采用精密整平、对中技术设置全站仪, 确保仪器中心和地面标志中心的平面位置一致. 在平差计算时, 全站仪测站位置作为未知参数, 可求得坐标值, 和其地面标志的坐标值进行比较(如表 1 所示), 大部分偏差都很小, 反映了全站仪整平、对中、瞄准和测量及跟踪仪测量等因素作用下的综合精度.

表 1 全站仪测站点和该点的平差结果比较

编号	偏差/mm		总计
	Δx	Δy	
S11	-0.12	-0.24	0.27
T1	0.04	0.08	0.09
T2	-0.30	0.16	0.34
T3	-0.15	-0.36	0.39
T4	0.08	-0.41	0.41
T5	-0.04	-0.09	0.10
T6	0.05	-0.02	0.05
T7	0.16	-0.27	0.31
T8	-0.09	0.09	0.13
S331	-0.02	0.08	0.08

综合以上的分析, 可得出以下结论:

1) 由于平差时不同的基准及方案选择会对结果造成重大影响, 所以三维控制网和传统的控制网在结果上会存在一定的差异, 但是该量级较小, 且非常平滑. 相对于传统的控制网, 从保证粒子加速器束流轨道的平滑性这一重要目的来说, 三维控制的精度是足够的.

2) 就全站仪来说, 它以时间的损失为代价, 较好

的提高了三维控制网的高程测量精度. 当存在高精度要求时, 通过全站仪测量提高精度是一个不错的途径.

3) 由于三维控制网采用光束法原理平差, 除了外界环境外, 仪器在测量时的姿态及控制点的空间位置分布都会对控制网结果造成较大影响, 容易造成误差的积累, 特别在高程方向上, 存在系统误差的可能性较大. 可采取精密水准测量手段或高精度的控制点对测量成果进行修正.

4 结束语

得益于现代精密测量仪器和方法的发展, 获得高精度加速器准直测量控制网的方法发生了很大的改变, 可靠性、效率等指标也显得比以往更加重要. 在合理应用的条件下, 三维控制网可同时达到这几个指标, 具有非常好的应用前景.

本文介绍了在 BEPC II 储存环用全站仪和激光跟踪仪进行三维控制网测量的情况, 通过和 BEPC II 正式控制网成果的比较, 分析了全站仪对控制网精度的改善作用及三维控制网的优缺点: 优点是控制网布设灵活, 测量效率高, 得到的可用控制网点很多; 缺点是控制网易受误差积累的影响, 应采取措施进行修正.

本研究的目的是不是局限于对控制网测量技术的研究, 而是为了更好的应用, 各种改进措施及提高精度的手段将进一步深入探讨, 直接或间接的用于国家重大科学工程上海光源的准直测量控制网, 并服务于其他的大型精密工程测量任务.

参考文献(References)

- 1 ZHANG Zheng-Lu, WU Dong-Cai, YANG Ren. Precise Engineering Survey. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1992 (in Chinese)
(张正禄, 吴栋材, 杨仁. 精密工程测量. 北京: 测绘出版社, 1992)
- 2 IWAA2004 Proceedings <http://iwaa2004.web.cern.ch/IWAA2004/>, 2005-7-20
- 3 YU Cheng-Hao. Geomatics Technology and Equipment. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House. 2005, 43—45 (in Chinese)
(于成浩. 测绘技术装备. 西安: 西安地图出版社. 2005, 43—45)
- 4 Future Plan of IHEP. [http://chep.knu.ac.kr/ICFA-Seminar/ upload/9.28/Afternoon/session3/1068,13,BEPC future development, 2006-3-5](http://chep.knu.ac.kr/ICFA-Seminar/upload/9.28/Afternoon/session3/1068,13,BEPC%20future%20development,2006-3-5)
- 5 WU Yi-Lin, KONG Xiang-Yuan. Special Precise Engineering Survey. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1993. 11(in Chinese)
(吴翼麟, 孔祥元. 特种精密工程测量. 北京: 测绘出版社, 1993. 11)
- 6 Axyz Mathematics for Users. Switzerland: Leica Geosystems AG, 2002
- 7 L3.TDA5005. <http://www.leica-geosystems.com/>, 2005-5-20
- 8 SA-USMN Training Manual. http://www.spatialanalyzer.com/sa_documents.htm, 2005-5-20

Application Research of 3D Control Network Technology in BEPC II Storage Ring^{*}

YU Cheng-Hao^{1;1)} KE Ming¹ DU Han-Wen¹ YIN Li-Xin¹ ZHAO Zhen-Tang¹
DONG Lan² HUANG Kai-Xi²

1 (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Firstly, this paper introduces the characteristic of accelerator survey and alignment control network and the BEPC II control network in storage ring. Then presents the application and research situation of 3D control network based on Total Station and Laser Tracker in the storage ring, which is the first time application that the unified utilization of the two types instruments in such a big dimension. The emphasis is the merit and deficiency of 3D control network and the contribution of observation from Total Station. Finally, the nice application foreground of 3D control network technology is predicted.

Key words 3D control network, accelerator survey and alignment, laser tracker, total station

Received 24 January 2006

* Supported by National Mega-Science Facility SSRF

1) E-mail: yuchenghao@sinap.ac.cn