

兆瓦级塔式太阳能热发电实验电站

王志峰

一、兆瓦级电站的建立

2012 年冬季，位于北京市西北方向 75 千米处的八达岭长城脚下，一座百余米的白塔在呼啸的寒风残雪中赫然耸立，一万平米的定日镜场在晴空下熠熠生辉，这个似乎在影片里才会出现的科学场景就是中国科学院电工研究所八达岭太阳能热发电实验电站。从施工到初见规模的 6 年间，电站第一次向公众揭开它的神秘面纱。

延庆电站的选址远离市区，是一片杂草丛生的荒郊地带，条件极为艰苦。电工所的前辈们十多年前就开始了太阳能热发电方面的相关研究工作，为后辈的努力开拓了道路。2006 年 12 月，国家“863”计划“太阳能热发电技术及系统示范”重点项目正式立项，国家加大了对太阳能热发电的支持力度。2012 年 8 月 9 日 13 时 18 分，当太阳能集热场输出的过热蒸汽推动汽轮机升速到额定转速 6500 rpm（每分钟转数），绿色电流通过的瞬间，首次发电成功。中国成为第一个完全自主知识产权的 MW 级太阳能热发电站全线贯通的国家，这也标志着我国掌握了大型太阳能热发电站集成技术及调试和运

行技术。

太阳能热发电是太阳能利用的一种技术形式，和其他可再生能源发电技术相比，具有电力输出平稳和电网友好性的特点。2007 年，在国家发展和改革委员会发布的《可再生能源中长期发展规划》中，太阳能热发电被列为重点发展领域之一。“十一五”期间，国家“863”计划设立了“太阳能热发电技术及系统示范”重点项目，本项目圆满完成，全面掌握了拥有自主知识产权的技术，使我国进入太阳能热发电技术国际先进行列，成为少数几个能够自主完成电站设计、集成、装备设计、生产的国家之一。

“太阳能热发电技术及系统示范”重点项目由西安交通大学、

中山大学、皇明太阳能股份有限公司、中国华电工程（集团）公司、北京精诚彩龙钢结构有限公司、东莞理工学院、河海大学、中国科学院长春光机所、中国科学院工程热物理所、中国科学院电工所、中国科学院上海硅酸盐所等单位共同合作完成，建成的太阳能热发电实验示范电站是我国自行研发、设计和建造的 MW 级塔式太阳能电站。

本项目建成的太阳能热发电实验示范电站是我国自行研发、设计和建造的 MW 级塔式太阳能电站，亦是亚洲首座兆瓦级电站。它采用了高低温两级蓄热技术，集成了自主知识产权的高倍太阳聚光技术、高低温两级蓄热技术、定日镜场优化布置技术、多模式复合控



图 1 2012 年暴雪后工作中的电站

制技术和系统集成技术，并在逐步建立规范和标准体系，引领我国塔式太阳能热发电技术的商业化发展。在核心装备方面，自行研制的定日镜可以在 6 级风下达到好于 3.5 mrad 的控制精度，并具有成本低和安装便利等优点，性价比可与国际同类机型竞争；高低温两级蓄热技术能够满足系统全天候稳定运行，并且符合能量梯级利用的原理，具有很高的能源利用效率；定日镜场优化布置技术考虑土地综合利用，在国际上独具一格；创新性的提出了水 / 水蒸气工质吸热器过热段的保护方法，可以在高密度不均匀热流密度下安全工作，直接发生过热 4 MPa，400℃ 的过热蒸汽；系统能够采用了吸热、储热以及发电单元模块耦合和解耦运行模式相结合的 11 种运行模式，可以宽参数滑压运行，使系统具有更高的安全性、稳定性和灵活性。目前系统已经工作 350 小时以上，并成功实现发电。这一集核心装备、协调控制、系统集成多项高科技与一体的技术突破，使我国成为能够独立设计和建设规模化太阳能热发电站的

4 个国家之一（西班牙、美国、德国、中国）。同时，本项目成果对于国家的节能减排可持续发展具有重要意义，按照延庆当地的太阳直射辐射资源计算，电站的年发电量达到约 195 万度。相比较传统的火力电站，每年可以节约标准煤 663 t，减少排放：CO₂ 2336.6 t、SO₂ 17.5 t、NO_x 7.8 t、粉尘颗粒 136.3 t。我国广大的西部、北部地区日照资源丰富，本技术成果在西北部的大面积推广将极大的减少我国化石能源的消耗量，对于国家的能源安全具有重要意义。

二、什么是太阳能热发电

太阳能是世界范围内存储量最大的可利用能源，太阳辐射到地球陆地表面的能量，一年大约有 17 万亿 kW，仅占到达地球大气外层表面总辐射量的 10%。相当于目前全世界一年内能量消耗总量的 3.5 万倍。对于日益上升的人类需求而言，在未来 40 亿年里，在太阳能的使用方面完全可以实现能源的可持续发展。

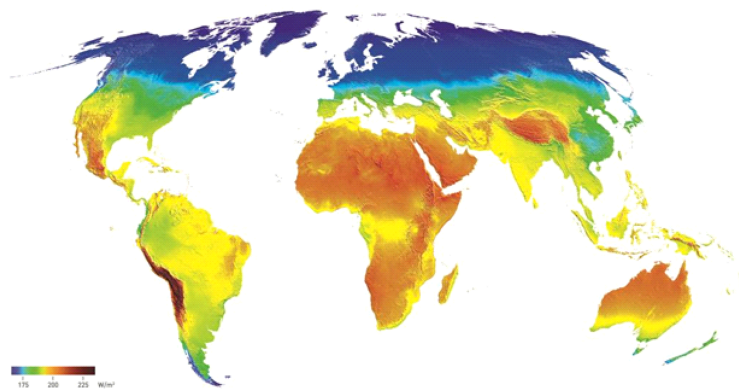


图 2 全球太阳能资源分布图（3TIER 数据）

太阳能热发电是通过“光-热-功”的转化过程实现发电的一种技术形式。可再生能源发电技术面临的主要挑战之一就是如何把能量储存起来，从而实现电力的可调节性。太阳能热发电站可以带有蓄热系统，将白天多余的能量储存起来，当太阳辐照不好时，蓄存的热能可以被释放出来，使汽轮机持续运行，从而保证输出电力的稳定性，并增加全负荷运行时数。同时，太阳能热发电站也可以利用化石燃料进行补燃，可以在晚上或连续阴天的时候持续发电。目前太阳能热发电正在全球范围内迅速发展。截至 2011 年 7 月，国外处于运行状态的太阳能热发电站（包括示范电站）共 42 座，装机容量总计 1394.3 MW。其中，西班牙境内共有 21 座太阳能热发电站。目前国外正在建设中的太阳能热发电站的装机容量约为 2.747 GW，其中美国在建装机容量 1.4 GW，西班牙在建装机容量 1.3 GW。

而光伏发电系统是利用半导体界面的光生伏特效应而将光能直接转变为电能的一种技术。这种技术的关键元件是太阳能电池。太阳能电池经过串联后进行封装保护可形成大面积的太阳电池组件，再配合上功率控制器等部件就形成了光伏发电系统装置。

三、国外太阳能光热产业发展现状

世界太阳能科技和应用发展迅猛，2008 年金融危机后，德国、

日本、美国等纷纷调高发展目标。预计太阳能发电将在 2030 年占到世界能源供给的 10%，对世界的能源供给和能源结构调整提供实质性的贡献。

太阳能热发电近年在欧美地区发展迅猛。截至 2012 年 1 月，全球已经投入运行的太阳能热发电总装机容量约为 1770 MW，在建系统超过 224 万 kW，系统年平均效率达到 12% 以上。面向承担基础电力负荷的“大容量-高参数-长周期储热”是国际太阳能热发电的技术发展趋势。目前，太阳能热发电成本价格在 0.2 欧元/kWh，到 2020 年有望降低到 0.05 欧元/kWh。

2011 年底，国外累计投入运行的太阳能热发电总装机容量约为 1770 MW。西班牙和美国是主要市场，主要原因在于西班牙和美国都实施了例如上网电价和可再生能源配额以及投资税收抵免等刺激政策。另外，德国、以色列、意大利、埃及和泰国境内各有一座商业化示范太阳能热发电站。在已经运行的太阳能热发电装机中，以导热油为传热介质的槽式技术应用最多（83.1%）。以水/蒸汽、熔融盐和空气为传热介质的塔式技术都有部署。其中约占 61.5% 的电站带有储热系统；7.5 h 熔融盐储热技术应用最广，15 h 熔融盐储热技术也有商业化应用。

2010 年国际能源署指出，在太阳能资源非常好的地区，太阳能热发电有望成为具有竞争力的大容量电源，到 2020 年承担调峰和中间电

力负荷，2025 至 2030 年以后承担基础负荷电力。在适度的政策支持下，到 2050 年太阳能热发电能够满足全球 11.3% 的电力需求，其中 9.6% 来自于纯太阳能电力，另外 1.7% 来自辅助燃料（化石燃料或生物质）。

美国能源部提出，到 2015 年，蓄热 6 h 的太阳能热发电成本降至 8~10 美分/kWh，满足中等负荷市场需求；到 2020 年，蓄热 12~17 h 的太阳能热发电成本降至 5~7 美分/kWh，满足基础负荷市场需求。

采用跨季节储热的区域性建筑供暖是太阳能低温热利用的发展趋势。太阳能建筑采暖技术是未来重要的太阳能产业化发展方向。我国建筑采暖能耗几乎占到全国建筑总能耗的 50%，约 2.6 亿吨标煤/年，是生活热水能耗的 10 倍。假设仅用太阳能解决 20% 的采暖需求，则需要至少 5 亿 m² 的集热面积，粗略估算年产值 5000 亿元以上，将是我国未来重要支柱型产业之一。另外，研究高效、可靠单元化太阳能中温转换利用装置和系统，推进太阳能在工业加热等领域的应用是太阳能中温热利用的发展趋势。

目前，基于太阳能热发电重点发展国家的当地电力负荷需求的假设，我们对至 2015 年全球太阳能热发电装机容量的预测如下：欧洲地中海地区的太阳法向直射辐射在 1900~2250 kWh/m²/年，相对其他适合发展太阳能热发电的地区光照强度偏低，因此太阳能热发电发电成本较高，太阳法向直射辐射最高的地区为西班牙（2250 kWh/m²/年）。

由于在太阳法向直射辐射较低的地区建设太阳能热发电站可能导致较高的发电成本，因此意大利、法国、德国等在 2006 年至 2008 年间相继制定太阳能热发电固定上网电价政策后，太阳能热发电的装机容量并未出现类似西班牙的迅速增长。预计西班牙在未来 5 年仍将是欧洲太阳能热发电的主要建设国家。根据西班牙政府规划，至 2013 年，西班牙太阳能热发电的累计装机容量目标为 2440 MW，由于已经申报的项目已达 4500 MW，预计该目标完全可以实现。欧洲地中海地区的其他国家太阳能热发电装机容量预计将保持平稳增长态势。预计至 2015 年，欧洲地中海地区太阳能热发电装机容量可实现 3200 MW。

据世界太阳能光热发展趋势来看，太阳能热发电装机容量将进行累加，我们预计到 2015 年全球太阳能热发电装机容量将达到 22 GW 左右，在 2012 年后进入建设高峰。

四、国内太阳能光热产业发展现状

和国外相比，太阳能热发电市场在中国的发展还显得滞后。随着 2011 年 1 月第一座商业化 50 MW 太阳能热发电项目特许权招标的结束，太阳能热发电技术在国内开始进入商业化工程示范阶段，市场开始启动。

根据科技部太阳能光热产业技术创新战略联盟统计，截至 2011

年7月,国内已经搭建的太阳能高温集热系统共19个。

目前,获得国家发展和改革委员会上网电价批准的太阳能热发电项目1个,处于建设和筹备阶段的太阳能热发电项目共9个,总装机容量约450 MW。

经过十多年的发展,我国建设完成了首个具有完全自主知识产权的MW级塔式热发电站,掌握了以水/蒸汽为工质的塔式电站的系统集成技术和单元关键部件的设计工艺,并积累了MW级水/蒸汽塔式电站的运行经验。探索了槽式和碟式发电系统关键部件的设计生产工艺,目前有多家生产商已经建立或初步建立了槽式真空管生产线和反射镜生产线。高温镀膜吸热钢管和熔融盐材料已批量出口西班牙。

我国在被动太阳能房、低温热水集热技术方面已经达到世界领先水平,但在规模化太阳能采暖方面理论基础研究薄弱,区域太阳能建筑供暖应用仍为空白,储热材料、低成本储热系统以及相关装备研发水平不高。

从整体发展阶段来看,我国塔式太阳能热发电技术处于示范阶段,槽式技术处于中试阶段,碟式和菲涅尔式技术处于试验阶段,均晚于国外。在太阳能热发电材料、装备方面,我国与国外差距约5年。在电站集成、服务方面,我国比国外落后约23年。在生产装备方面,我国落后约25年。按照权重一致的假设综合概算,我国太阳能热发电技术总体落后国际技术先进国家约15年。

塔式太阳能热发电系统也称

集中型太阳能热发电系统。塔式太阳能热发电系统的基本形式是利用独立跟踪太阳的定日镜群,将阳光聚集到固定在塔顶部的接收器上,用以产生高温,来加热工质产生过热蒸汽或高温气体,驱动汽轮机发电机组或燃气轮机发电机组发电,从而将太阳能转换为电能。塔式太阳能热发电系统聚光倍数高,容易达到较高的工作温度,阵列中的定日镜数目越多,其聚光比越大,接收器的集热温度也就越高;能量集中过程是靠反射光线一次完成的,方法简捷有效;接收器散热面积相对较小,因而可得到较高的光热转换效率。

槽式太阳能热发电系统全称为槽式抛物面反射镜太阳能热发电系统,是将多个槽型抛物面聚光集热器经过串并联的排列,加热工质,产生高温蒸汽,驱动汽轮机发电机组发电。槽式太阳能热发电系统通过聚光集热子系统、换热子系统、发电子系统、蓄热子系统和辅助能源子系统相互配合作。

碟式太阳能热发电系统是利用旋转抛物面反射镜,将入射阳光聚集在焦点上,放置在焦点处的太阳能接收器收集较高温度的热能,加热工质,驱动发电机组发电;载在焦点处直接放置太阳能斯特林(stirling)发电装置发电。整个系统包括:旋转抛物面反射镜、接收器、跟踪装置和蓄热系统。具有寿命长、效率高、灵活性强等特点,可以单台供电,也可以多套并联使用。

我国在区域太阳能建筑供暖技术、太阳能中温工业节能应用和国外基本处于同一发展阶段,刚刚

起步。然而,国外的大规模示范系统比我国要多些,设计经验稍微充分一些。

从目前全国太阳能热利用产业发展情况来看,太阳能光热技术产业发展有序。国家对于太阳能热利用产业不但给予了政策层面的支持,在技术标准规则方面也是加强了支持力度,并予以完善。在2010年科技部支持成立了太阳能光热产业技术创新战略联盟,2011年科技部支持成立了国家太阳能热利用工程技术研究中心。太阳能热利用技术呈现应用形式多样化、产品适应市场化、技术发展全面化等特点。

在太阳能低温热利用领域,太阳能热水器是我国太阳能利用中应用最广泛、产业化发展最迅速的产品。由我国自主开发生产的全玻璃真空管太阳集热器的科技水平、制造技术、生产规模均处于国际领先水平,且生产成本低廉,具有很强的国际竞争力。ISO已经确定全玻璃真空管的国际标准将由我国牵头制定。我国的太阳热水器产业自20世纪90年代后期以来发展迅速,生产量由2000年的640万 m^2 /年增长到2011年的5760万 m^2 /年,热水器的总保有量由2000年的2600万 m^2 增长到2011年的1.936亿 m^2 ,形成一定的产业规模。已建成被动太阳房超过2000万 m^2 ,推广太阳灶200万台,并出口到非洲等许多国家和地区60万台左右。在太阳能下乡政策和新农村建设的形势下,农村太阳能市场正成为多数企业的主攻目标。2010年农村销售量占到全国当年总销量的50%

左右,农村许多地方的太阳能普及率已达到了 55% 以上。除国内市场外,企业也普遍重视国际市场,2010 年全行业出口额达 2.5 亿美元,出口 154 个国家和地区。

在国家政策的大力支持和帮助下,国内涌现了一大批太阳能产业的龙头企业。这些大型骨干企业综合实力和产值连续提高。它们在研发能力、自主创新能力、企业文化建设、专利技术、工程技术、现代化设备、国际竞争力等方面是行业的先锋,也是引导产业健康发展,规范太阳能热水器市场秩序的主力军。2012 年 5 月 21 日,日出东方太阳能 A 股主板上市成功,这是我国太阳能热水器企业借助资本市场快速发展的重要标志。

太阳能热发电领域,在科技部“十一五”重点项目的支持下,中国科学院等多家单位联合对 MW 级塔式太阳能热发电技术进行了研究。项目团队包括 4 家研究所,4 家公司和 3 所大学。经过项目团队 6 年团结协作和艰苦奋斗,项目在太阳能热发电的核心技术,如太阳能聚光、太阳能光热转换、单台吸热器直接产生过热蒸汽、太阳能电站总体控制等核心技术有重大突破。2012 年 8 月 9 日,八达岭太阳能热发电实验电站全系统贯通,运行发电!这标志着我国已经初步掌握太阳能热发电集成建设技术和核心部件生产技术。

五、自主知识产权阐述

1. 两级储热

我国首座热发电站——八达

岭太阳能热发电站,采用水/蒸汽为传热流体,该电站的发电功率为 1 MW,采用主动型的直接蒸汽储热与双罐间接储热相结合的储热系统,储热介质为导热油和高温水蒸气。充热过程为:冷罐中的导热油在油泵的输送下,在左侧的充热换热器中与来自吸热器或锅炉的高温过热蒸汽(390 °C, 2.9 MPa)进行热交换,吸热后的高温导热油(370°C)储存在热罐中,在云遮、夜晚和阴雨的情况下使用。在充热换热器内放热后的过热蒸汽变成饱和蒸汽(2.5 MPa, 265°C)进入蒸汽蓄热器中储存。放热过程:饱和蒸汽(1.0 ~ 2.5 MPa)从蒸汽蓄热器闪蒸出来,进入右侧的放热换热器中与来自高温油罐的高温导热油换热后变为过热蒸汽(1.0 ~ 2.5 MPa, 350°C),过热蒸汽进入汽轮机发电。放热后温度降低的导热油进入低温油罐储存。

2. 定日镜跟踪理论及其应用

基于双轴跟踪理论揭示了定日镜双轴跟踪的几何本质,并且在考虑镜面偏心距的情况下推导得到了基础自旋-俯仰跟踪公式,适用于由任何算法计算出的太阳位置向量;推导得到了针对镜面偏心距的跟踪目标为靶心或偏离靶心的跟踪仰角公式和偏置跟踪仰角公式。开发了跟踪纠偏策略,保证了轮胎面定日镜的高运行跟踪精度,极大地丰富了定日镜跟踪理论。

推导得到了包含镜面偏心距和其他典型几何误差参数的准确方位-俯仰跟踪公式,解决了定日镜跟踪理论上的一个难题,填补了几

十年来镜面偏心定日镜没有准确方位-俯仰跟踪公式的国际空白。该通用跟踪公式得到了专门设计的基于三坐标机测量平台的激光束方位-俯仰跟踪实验的验证。

3. 聚光器抗风性能研究

对定日镜进行了风洞实验和数值模拟的研究,开展了定日镜风压分布、不同风向角下的风荷载受力和风致响应变形的分析。主要研究成果包括:(1)提出定日镜结构风荷载的确定方法。通过对定日镜的风洞实验、理论分析和数值模拟研究,获得定日镜风压分布的规律和特征、体型系数,确定定日镜结构的风荷载及计算公式,获得定日镜不同风向角下的整体受力特征和规律,为定日镜的抗风设计提供基本的参数。(2)建立定日镜结构的风致响应的计算方法。在风洞试验、数值模拟研究的基础上,建立定日镜风致变形的计算方法。

(3)定日镜结构的抗风优化措施。给出定日镜有利于抗风的停放姿态,给出适于镜面板变形计算的理论分析、相应公式和有利于抗风的镜面板布置方案、变形控制措施,提出定日镜结构型式和构造的优化建议,并提出一系列详细的定日镜抗风设计建议。

对槽式聚光器进行了风荷载和风致响应的现场实测研究,准确获得槽式聚光器风压分布规律和风荷载特征规律,提出了槽式聚光器的真空管风速和俯仰角度变化的振动特性。提出太阳能聚光器场的强风风场规律和特征。研究成果在国际期刊 *Solar Energy* 杂志上发表,

得到了审稿人德国宇航中心主任罗伯特（Robert）教授的高度评价，认为论文的实测结果可以成为检验风洞实验和数值模拟结果准确度的依据。

4. 高温真空集热管研究

成功开发了金属与玻璃匹配封接和非匹配封接两种技术，分析和探索玻璃与金属封接热应力产生机理，研发新型集热管 2 种，并研制出符合国际通用标准的 4.06 m 长集热管，并已于 2010 年 10 月应用于延庆 100 m 长抛物面槽式聚光集热系统。它标志着我国已掌握槽式太阳能热发电核心技术，电工所与皇明太阳能公司合作，完成了批量化生产工作，为国内第一座 50 MW 槽式太阳能热发电站提供抛物面槽式吸热管。

设计开发了真空集热管的热损测试平台，具备实验室级真空集

热管热性能测试能力。除此之外，电站还在熔融盐工质传热特性与吸热器研究，碳化硅泡沫陶瓷空气吸热器研究，太阳能海水淡化等方面都取得了一定成绩。

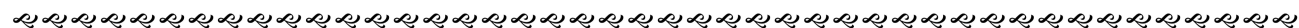
六、结语

电站是边科研、边设计、边土建、边安装、边调试的创新难度极大的“五边”科学工程，工地上同时交叉作业的施工队伍最多时达到 8 家，由于采取先进科学管理方法和严格有效的管理步骤，电站建设至今未出现过重大质量事故，这对没有任何经验的我国第一个太阳能热发电站建设来说是难能可贵的，也为我国太阳能热发电站的建设管理提供了宝贵经验。团队不但掌握了原创性技术，大范围普及了太阳能知识，为中国太阳能热发电建立

了强大的科研基地，而且在建设过程中培养了大量的人才，对推动国家太阳能热发电技术、政策等起到了积极的作用，更是在国际上占据了重要席位，为我国的太阳能热利用事业打下了良好的基础。

虽然我们完成了项目，建成了电站，但是依然任重道远。首先，我们应提高全民对可再生能源的利用意识，将延庆八达岭太阳能热发电科普基地向广大民众推广开来，将太阳能热利用知识普及到社会的各个角落。其次，应提高太阳能热发电的持久性、稳定性研究，使太阳能成为一种有保障的能源储备。最后，应趁热打铁，继续深入研究和开发太阳能热发电技术，并将其推向产业化发展，逐渐替代煤、石油等传统型能源消耗。

（北京中国科学院电工研究所 100190）



封三照片说明：

核武器作为独一无二的尖端武器，在武器库中有着其他武器不可取代的特殊地位。1942 年，美国总统罗斯福决定成立原子弹研究机构，该机构总部设在纽约，代号为“曼哈顿工程”。工程投资 22 亿美元，投入人力达 50 多万。工程由格罗夫斯负责全面指挥，芝加哥大学教授康普顿负责裂变材料的制备工作，美籍意大利著名科学家费米负责制造原子反应堆，物理学家奥本海默为原子弹总设计师。1945 年 7 月 16 日美国进行了首次原子弹试验，当这枚被命名

为“小玩意”的世界上第一颗原子弹在美国西南部沙漠爆炸时，伴着一道强烈的闪光划过，地平线上升起一个巨大的火球，它向上翻腾，形成了巨大的蘑菇云，忽然一声巨响，极度的高温和强大的冲击波以排山倒海之势顷刻间把试验场的一切化为乌有，仿佛地狱一般。当时，奥本海默在观察站里，望着爆炸巨大的冲天火球和刺眼的闪光，无不感慨地吟诵梵语：“漫天奇光异彩，犹如圣灵逞威，只有一千个太阳，才能与其争辉。我是死神，我是世界的毁灭者。”从此，潘多拉的盒子被打开，世界进入了令人

恐惧的核武时代。而二战后期美国在日本广岛和长崎先后投下的两颗原子弹，使世人更加看清了核武带来的巨大灾难，约束核武，反对核武的呼声日益高涨。虽然以美俄为首的拥核国家做出了一些举措，但现在世界上还部署着大约 3 万件核弹，足以毁灭地球上所有生物好几番。目前核武器不只是战场上的终极武器，还是外交与政治舞台上博弈的筹码，从美苏冷战到印巴之争，从伊朗到朝鲜半岛——无处不有核武的影子。了解核武器，制约核武器，最终销毁核武器是全人类的共同目标。