

实际环境下光储离网型发电系统优化设计研究

康慨 孙振宇 张超 张云龙 李慧
(湖北省电力勘测设计院有限公司, 武汉 430040)

摘要: 偏远和无电地区远离电网, 采用含光储离网型发电系统是解决当地电力缺失的重要手段。为充分利用可再生能源及解决偏远和无电区的经济性供电问题, 提出了以系统负载满足率、全寿命成本为主要约束因子, 从用户负荷特性、太阳能资源分析、光伏组件的实际环境发电特性、储能特性、电能匹配特性等角度研究光储离网型发电系统的优化设计方法。通过对非洲某地区的供电需求分析, 光储离网型发电系统较经济地满足了当地的基本供电问题。

关键词: 光储, 电力短缺, 预期负荷率, 全寿命成本

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.017

Study on Optimal Design Method for Stand-Alone Solar-Battery Hybrid Power System in a Practical Environment

Kang Kai, Sun Zhenyu, Zhang Chao, Zhang Yunlong, Li Hui
(Power China Hubei Electric Engineering Corporation Limited, Wuhan 430040)

Abstract: Remote areas and areas without electricity are usually unable to access the power grid. An off-grid solar-battery system is a good way to decrease local power shortages. To make full use of renewable energy and economically provide power to remote areas and areas without electricity, some additional information regarding influencing variables is needed. We need to identify the expected load rate and life cycle cost, load characteristic, solar resource analysis, actual environment characteristics of photovoltaic modules, energy storage, and power matching characteristics. We used these factors to optimize the design of an off-grid solar-battery system. The results show that the optimal storage of an off-grid solar-battery system can satisfy the local basic power supply economically in a region of Africa.

Keywords: solar-battery, power shortage, expected load rate, life cycle cost

0 引言

随着全球化的深入, 人类社会发展提速, 经济发展和生活质量的提高与电能的发展越来越紧密, 但根据《2018年离网太阳能市场趋势报告》, 全球仍有超过10亿人生活在无电地区, 其中近50%人居住在撒哈拉以南非洲地区, 近30%人居住在南亚, 能源缺乏严重限制了上述地区的经济发展。而化石能源的利用将使全球变暖的趋势和对大气的污染加剧, 发展可再生清洁能源的电力供应受到了全球的高度关注, 其中光储离网型发电系统具有易实施、经济性好、可扩展化、易维护等特点, 受到了广泛的研究和运用。

目前, 国内外学者针对离网型互补系统进行了一定的研究。张涛^[1]介绍了离网型风光互补发电系统设计的构成机理、基本模式和设计要点。李丹等^[2]提出了基于NASA资源数据以风力发电机为基础的风光

互补发电系统设计计算模型, 开发了用于风光互补发电系统配置的计算程序。李品等^[3]提出了一种基于全年负载缺电率和全寿命周期成本为优化目标的风光储互补发电系统优化设计方法。高峰等^[4]提出了以电源总成本、负荷缺电率、电能浪费率、风/光输出功率波动率 4 个指标最小为目标函数, 并采用具有自适应交叉和变异操作的改进遗传算法进行求解容量优化配置。上述文献中, 有的未对总成本进行优化; 有的虽然以总成本、负荷缺电率进行多目标优化, 但忽略了系统中光伏的实际环境运行特性和全寿命周期负荷匹配性^[5], 且未给出工程实际的计算方法; 有的采用了 HOMER 和 Hybrid2 软件进行校验, 忽略了软件控制策略对实际光储离网型发电系统的适用性^[6-7]。本文根据系统实际运行特性, 以系统负载满足率、寿命周期成本为主要约束因子, 从用户负荷特性、太阳能资源分析、光伏组件实际环境发电特性、储能特性、电能匹配特性等角度分析, 给出了光储离网型发电系统的

收稿日期: 2018 年 9 月 19 日; 修回日期: 2018 年 12 月 25 日
第一作者: 康慨 (1987—), Email: kkangkai@163.com

① HOMER Software. Available: <http://www.homerenergy.com>.

优化设计方法，并通过实例进行了分析及运用。

1 光储离网型发电系统概述

光储离网型发电系统如图1所示，主要包括光伏组件、光储一体机、储能单元、负荷以及监控及计量系统。光伏组件将太阳能转换为电能，通过汇流箱和光伏控制器将电能存储在储能单元或者经过逆变器转换为交流电，是光伏系统的能源生产单元，也是系统投资较大的部分；储能单元主要用来储存系统过剩的电能，并在光伏发电功率不足时、晚上以及阴雨天时，将储存的直流电能经逆变器输出供给负荷使用，也是系统投资较大的部分；光储一体机是将直流电转化为交流电的设备，通常和控制器集成在一起，兼顾逆变和控制功能，其作用是将直流电转变为满足一定要求的交流电能；监控系统用于集中记录并显示光伏组件运行情况、系统运行参数及电能输出情况，以及用户用电量等数据，便于运行维护人员实时掌握系统运行状况。

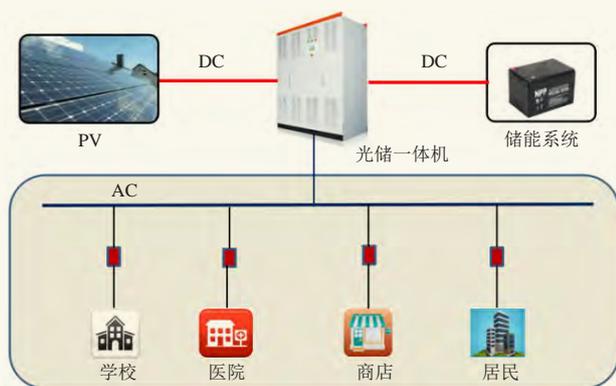


图1 光储离网型发电系统供电原理图

Fig. 1 Power supply schematic diagram of off-grid solar-battery power system

2 系统优化设计方法

2.1 负荷分析及典型负荷的提取

电力用户的负荷变化是一个非稳态的随机过程，与用电习惯和负荷特性有很大关系。根据负荷曲线时间尺度的不同，可分为年度、季度、月度以及周典型日负荷曲线等，考虑到偏远区和无电区用户的实际用电时间、习惯、负荷特性及用户数据资料搜集的难度，本文以月度典型日负荷进行分析。典型负荷曲线提取方法主要有最大日负荷、均值法、加权平均法、聚类算法等^[8-10]，考虑到系统的经济性和负荷满足率问题，本文以加权平均法作为提取方法。

1) 负荷的分析

由于偏远或无电区域大多未安装电能计量表，负荷数据搜集较为困难，目前通用的做法是进行现场季

节性调研。在调研过程中对负荷类型进行分类统计，需着重对居民、政府机构、军营、职高中、小初中、医院、卫生所、教堂、清真寺、工业厂、商户、路灯等公共用电负荷和用户负荷的用电时间、负荷类型、用电习惯以及同时率问题进行调查分析，并整理出相应的负荷分析表，如表1所示。

表1 负荷分析
Table 1 Load analysis

类型	负荷/kW	同时率	备注
居民	0.08	0.7	用户考虑5人/户，按LED灯考虑，一般LED灯为20 W左右，每户考虑一个电器100 W
政府	8	0.9	10个房间，考虑空调或电扇，空调2.5 kW/台，照明250 W/间
军营	20.4	0.8	主要考虑照明，少量办公负荷，按10间办公室考虑，其中4间空调及照明共2.6 kW，6间电扇及照明共60W，200间宿舍，每间照明0.05 kW
初中	5.7	0.7	2间办公室空调及照明共2.6 kW，教室10间，每间照明及电扇0.05 kW
小学	3.1	0.7	1间办公室空调及照明共2.6 kW，教室10间，每间照明及电扇0.05 kW
医院	46	0.8	办公室10间，每间空调及照明共2.6 kW，病房20间，每间照明及医用设备共1 kW
卫生所	13.2	0.8	办公室2间，每间空调及照明共2.6 kW，病房10间，每间照明及医用设备0.8 kW
教堂	1	0.9	照明1 kW，约50盏灯
寺庙	1	0.9	照明1 kW，约50盏灯
商户	1.3	0.8	冰箱2 kW（30%），空调2.5kW（20%），照明及其他
路灯	0.02	1	20 W/盏，LED灯，平均间距50 m

2) 典型负荷的提取

将日发电量作为月度典型负荷曲线中该日的权值，对月度负荷数据进行加权平均得到月度典型负荷曲线^[10]，根据该月度每天的发电量和总发电量，计算该月度第*j*时点的典型负荷 \bar{p}_j 为：

$$\bar{p}_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i,j} \Delta t}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{i,j} \Delta t} p_{i,j} \quad (1)$$

式中， Δt 为负荷采样时间，一般取1 h，与此同时*n*取值为24；*m*根据月度天数来取值； $p_{i,j}$ 为该月度第*i*天第*j*时的负荷。

2.2 光伏系统优化设计

对于光储离网型发电系统来说，光伏组件发电的能量来源于太阳，光伏阵列所接收的太阳辐射量与倾角有关，光伏阵面上所获得的辐射量决定了系统整体的发电量和正常运行，因此系统优化设计的前提是做好光资源分析、光伏阵列的倾角设计、组串设计以及容量设计。

目前在大多数系统设计时未详细分析各月的辐射量，而直接以全年月均辐射量为设计依据，且以年

均辐射量最大的倾角作为设计的倾角，忽略了每月典型日辐射量的变化特性、环境温度对光伏出力的影响以及负荷需求匹配性^[11]，从而导致了系统运行过程中负荷满足率低、初始投入成本高的缺点。下面以非洲某地区（14.4°E，14.3°N）实际的光资源分析为基础进行分析说明。对国际主流的太阳能资源评估数据源Meteonorm、SolarGIS和NASA进行数据分析比较，通过PVsyst得到该区域的不同倾角光伏斜面的辐射量，如表2所示。

表2 不同倾角光伏斜面太阳辐射（单位：(kW·h)/(m²·d)）
Table 2 Solar irradiation of photovoltaic inclined planes at different angles (unit: (kW·h)/(m²·d))

月份	温度/℃	0°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°	22°	24°
1	23.4	173	187	191	195	199	203	206	210	213	216	218
2	26.8	168	176	179	182	184	186	188	190	191	193	194
3	31	193	198	199	201	202	202	203	203	203	203	203
4	33.8	201	201	201	200	199	198	197	196	194	193	191
5	33.9	217	213	211	209	206	204	202	198	196	193	189
6	30.9	198	193	191	188	186	183	180	177	174	171	167
7	28.8	185	181	179	177	175	173	170	167	165	162	159
8	27	198	196	195	194	193	191	189	188	186	183	181
9	28.1	175	178	179	179	179	179	179	179	178	177	176
10	29.8	192	200	203	205	207	209	210	212	213	214	215
11	27.4	177	191	194	198	202	205	208	211	214	217	219
12	24.7	169	184	189	193	197	202	205	209	212	215	219
总计		2246	2298	2311	2321	2329	2335	2338	2339	2339	2336	2330

由表2可知，该区域斜面上辐射量最大的倾角为18°~20°，而在18°~20°时，7月斜面辐射量值很低，如果按照该角度进行光储系统设计，为了满足负荷需求，需增加光伏组件的装机容量，这样就会在10月一次年1月有大量的弃光产生，同时增加系统的总成本（组件超装和支架成本）。为了保证既能较好地满足负荷需求又不产生过量的弃光，需降低斜面倾角。当斜面倾角在8°~12°时，能较好地满足负荷满足率、弃光率低和总成本低的需求，另外，在设计过程中需考虑光伏出力与温度之间的关系，光伏组件随温度的功率效率如式（2）所示：

$$\eta = 1 - \alpha_p \times \left[\left(G_T \times \frac{T_{\text{NOCT}} - T_{\text{a,NOCT}}}{G_{\text{NOCT}}} + T_a \right) - 25 \right], \quad (2)$$

式中， α_p 为功率温度系数； G_T 为斜面辐照度； G_{NOCT} 为工作辐照度，一般取800 W/m²； T_{NOCT} 为一般组件温度； $T_{\text{a,NOCT}}$ 为NOCT对应的环境温度； T_a 为环境温度。

在考虑斜面倾角时还需考虑光伏月典型日的出力曲线与负荷的匹配情况，实际环境下光伏出力与负荷变化趋势、负荷满足率、弃光率低、总成本低等因素。在做光伏系统设计时，光伏组件串联数量的设计

也尤为重要，组串数量主要考虑温度、MPPT跟踪电压范围以及允许的最大直流电压，具体设计时可参考文献[12]，同时也需满足储能直流侧电压的范围。

2.3 系统容量优化设计

目前光储离网型发电系统应用区域通常具有白天用电量少、晚上用电量多的特点，且主要是居民用电。因此光储离网发电系统需满足白天用电，同时通过储能单元将白天剩余的电能存储起来，在光伏发电功率不足时、晚上以及阴雨天时，将储存的直流电能经逆变器输出供给负荷使用。在进行光伏系统容量设计时，考虑到光伏直接逆变和经储能然后再逆变后供应负荷时的效率不一样，在光伏系统设计时需综合光伏直接逆变供应的负荷、储能单元转换并逆变供应的负荷，也可粗略归类为有日照时的白天负荷、夜晚负荷以及阴雨天自给天数总负荷，则光伏系统设计容量可按式（3）考虑：

$$P_{\text{pv}} = \frac{\frac{Q_d \times (1+i)^n}{\eta_1} + \frac{Q_i \times (1+i)^n}{\eta_2}}{h_{\text{peak}} \times (1-\varphi_n)} \times \lambda, \quad (3)$$

式中， Q_d 为光伏直接逆变供应的电能； Q_i 为经储能逆变后供应的电能； i 为负荷增长率； h_{peak} 为日辐照峰值等效小时数； φ_n 为第 n 年的光伏衰减率； λ 为保证系统可靠系数，一般大于等于1； η_1 为光伏直接逆变时的效率，一般可取82%； η_2 为光伏经储能逆变后的效率，一般可取75%。

在进行储能系统的容量设计时，需考虑环境温度、放电深度、充放电效率、逆变效率、当地负荷特性以及阴雨天自给天数，储能容量的设计如式（4）：

$$S_d = \frac{(Q_0 + m \times Q_{\text{all}}) \times (1+i)^n}{\text{DOD} \times \eta_r \times \eta_{\text{DC}} \times \eta_{\text{inv}}}, \quad (4)$$

式中， m 为阴雨天自给天数； Q_{all} 为全天负荷需求电量；当 $m=0$ 时， Q_0 包含白天部分光伏瞬时功率不足以支撑的剩余负荷、夜间负荷、光资源大于典型日代表值时剩余的光伏发电量（如考虑经济性，此值也可不考虑）；当 $m \geq 1$ 时， Q_0 包含白天部分光伏瞬时功率不足以支撑的剩余负荷、夜间负荷； i 为负荷增长率； n 为第 n 年；DOD为最大放电深度； η_r 为温度修正系数； η_{DC} 为储能单元转换效率； η_{inv} 为逆变器效率。

3 实例分析与计算

非洲区域整体电力发展缓慢，大部分村庄至今尚未通电，但太阳能资源十分丰富，采取光储离网型发电系统可发挥太阳能资源优势，让能源与环境结合发展，改变此类区域边远地区民众无电可用的状态，缓解供电压力，下面以非洲某地区（14.4°E，14.3°N）

为案例进行分析与计算。

非洲某区域村庄有250户家庭，每个家庭负荷有照明、收音机，多个家庭才有1台电视机、电风扇；公共负荷有1个学校，1个活动中心，1个卫生所，2个寺庙，1个基站和40个路灯，该区域的光伏资源情况如表2所示。针对负荷情况和光资源情况，根据第2节中负荷的提取和分析方法、光伏系统优化方法，考虑到0.7的负荷同时率，得到非洲该区域典型的负荷曲线与8°、10°、12°倾角下光伏出力，如表3、图2—图4所示。

表3 考虑温度后不同倾角太阳辐照和实时负荷
Table 3 Solar irradiation of photovoltaic inclined planes at different angles considering temperature and hourly loads

时间	8°斜面辐射量/ (W/m ²)	10°斜面辐射量/ (W/m ²)	12°斜面辐射量/ (W/m ²)	负荷/kW
0.5	0	0	0	0.0
1.5	0	0	0	0.0
2.5	0	0	0	0.0
3.5	0	0	0	0.0
4.5	0	0	0	0.0
5.5	0	0	0	0.0
6.5	85	84	83	0.0
7.5	245	242	240	0.0
8.5	411	406	402	0.0
9.5	549	543	537	0.0
10.5	652	644	638	0.5
11.5	681	672	665	0.0
12.5	682	673	666	10.9
13.5	640	632	625	11.5
14.5	534	527	522	7.8
15.5	408	403	399	3.7
16.5	269	266	263	0.0
17.5	114	112	111	0.0
18.5	4	4	4	15.5
19.5	0	0	0	15.5
20.5	0	0	0	26.4
21.5	0	0	0	16.6
22.5	0	0	0	0.0
23.5	0	0	0	0.0

综合考虑满足斜面上实际环境下光伏出力与负荷变化趋势、负荷满足率、弃光率低、总成本低等因素，当斜面倾角为10°时为最优角度。

在进行光伏系统容量设计时，光伏组件10年后功率衰减为91%，20年后功率衰减为15%；根据需求项目仅考虑系统5年内年2%的负荷增长率，后期再进行扩建电源以满足增长符合的需求；为保证系统20年期间负荷需求电力， $(1+i)^n \times \lambda / (1-\varphi_n)$ 取值为1.2。根据负荷日典型曲线图可以看出，18时以前负荷均小于光



图2 考虑温度后8°斜面辐射量与负荷关系图

Fig. 2 Relationship between 8°angle radiation and load by considering temperature

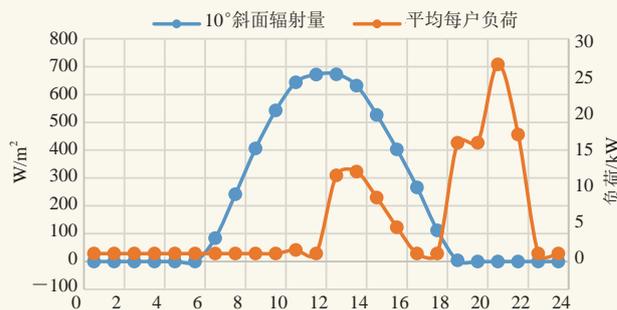


图3 考虑温度后10°斜面辐射量与负荷关系图

Fig. 3 Relationship between 10°angle radiation and load by considering temperature

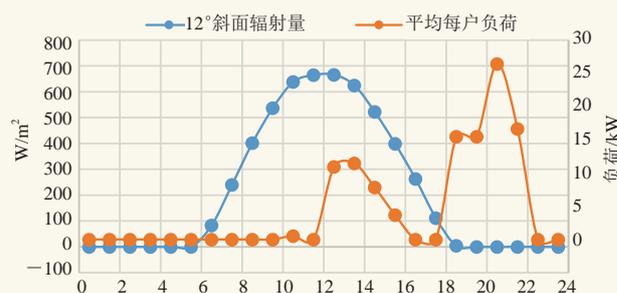


图4 考虑温度后12°斜面辐射量与负荷关系图

Fig. 4 Relationship between 12°angle radiation and load by considering temperature

伏出力，18时以后负荷出力大于光伏出力，因此白天光伏直接的供电量为34.43 kW·h，其他多余电能储存起来，晚上储能的供电量为74.02 kW·h，根据式(3)可得光伏的总装机容量为31.2 kW，考虑到光伏的组串组成，若采用315 W光伏板，装机容量为31.5 kW。

在进行储能容量设计时，为保持系统的经济性，仅考虑日照时当天备用，不考虑连续阴雨天供电，即m取值为0；DOD最大取值为0.7，温度修正系数暂取值为1，储能转换和逆变器逆变综合效率取值为0.92，根据该区域负荷特性，白天不存在负荷大于光伏出力，仅考虑晚上供电量的满足情况，因此可得储能的装机容量为126 kW·h，可采用158节2 V 400 Ah铅酸电

池组, 标称容量为126.4 kW·h。

采用如上系统配置后, 考虑到光伏、储能以及负荷用电, 第1年、第5年和第20年的典型日系统剩余电量累计图如图5所示, 可以看出, 第20年系统刚刚能够满足负荷总体需求, 第21年由于光伏组件持续的年衰减, 系统发电量不足以支撑负荷用电, 也同时说明了本优化方案的合理性。

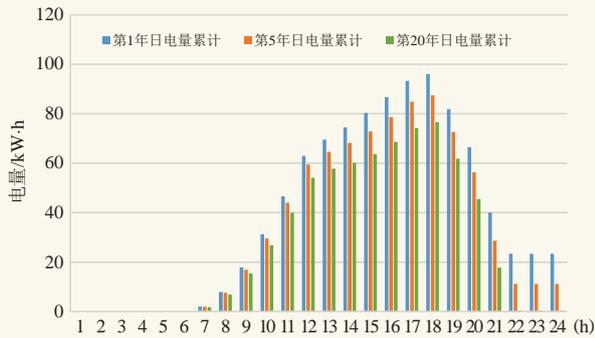


图5 第1、第5、第20年典型日电量剩余累计图

Fig. 5 Typical daily electricity residual accumulation in the 1st, 5th, and 20th years

4 结论

光储离网型发电系统利用当地的太阳能资源, 较经济地满足了偏远区和无电区人民的用电问题, 克服了传统采用柴油机发电带来的污染和高耗能问题。本

文从负荷分析、典型负荷提取、基于实际环境下光资源与负荷综合分析、容量优化设计等几个方面对光储离网型发电系统进行了优化设计, 并通过实际的案例进行了分析说明, 较好地满足了当地的供电需求, 也为后续为偏远区和无电区区域供电提供了参考。

参考文献

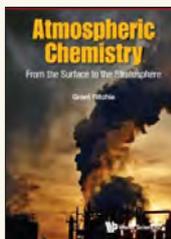
- [1] 张涛. 巴基斯坦50kW离网型风光互补发电系统设计. 太阳能, 2018, 4: 50-52.
- [2] 李丹, 彭军, 余岳峰. 离网型风光互补发电系统匹配方法优化研究. 广东电力, 2008, 36(3): 86-90.
- [3] 李品, 刘永前, 郭伟钊. 离网型风光储互补发电系统优化设计方法研究. 现代电力, 2010, 27(6): 51-57.
- [4] 高峰, 闫涛, 唐巍, 等. 独立风/光/储混合微电网多目标电源容量优化配置. 智能电网, 2016, 4(8): 802-810.
- [5] 连乾钧, 石磊, 康钦一, 等. 实用环境下光伏组件发电效率评价方法研究. 太阳能学报, 2018, 36(6): 1595-1599.
- [6] 余贻鑫, 孙冰, 马健. 计及用户停电损失的离网光伏与储能系统优化规划. 天津大学学报, 2016, 49(5): 443-449.
- [7] 刘冠群, 袁越, 王敏, 等. 考虑经济成本的光伏电站储能容量配置. 可再生能源, 2014, 32(1): 1-5.
- [8] 李翔, 顾洁. 运用聚类算法预测地区电网典型日负荷曲线. 电力与能源, 2013, 34(1): 47-50.
- [9] 李萌, 程浩忠, 杨宗麟, 等. 采用分形插值的典型日负荷曲线改进预测方法. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 36-41.
- [10] 修晓青, 唐巍, 马健. 用于储能容量配置的典型负荷曲线提取方法. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2234-2242.
- [11] 邓少平, 康慨, 别叶健, 等. 屋顶分布式光伏发电项目经济容量研究. 太阳能, 2017, 11: 18-24.
- [12] 邓芷欣, 康慨. 基于WRF模式的光伏电站系统优化设计研究. 电气应用, 2018, 37(11): 80-85.

新书架

NEW BOOK

编辑: 张萌

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Atmospheric Chemistry: from the Surface to the Stratosphere
《大气化学: 从地表到平流层》

编著者: Grant Ritchie
出版者: World Scientific Europe Ltd
出版年: 2016



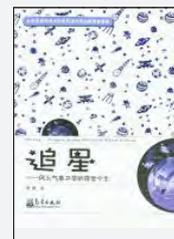
Remote Sensing Techniques and GIS Applications in Earth and Environmental Studies
《遥感技术和GIS在地球环境研究中的应用》

编著者: Abhisek Santra等
出版者: IGI Global
出版年: 2017



Hailstorms: Prediction, Control and Damage Assessment
《雹暴: 预测、防雹和灾害评估》

编著者: P. Kumar
出版者: CRC Press
出版年: 2017



《追星: 风云气象卫星的前世今生》

编著者: 曹静
出版者: 气象出版社
出版年: 2018