



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

太阳能发电 系统控制技术

Control of Solar Energy Systems

Eduardo F. Camacho

Manuel Berenguel

(西)

Francisco R. Rubio

著

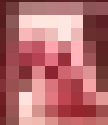
Diego Martínez

项安 喻志伟 魏山力

译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





中国工程教育认证通过院校

Springer

太阳能发电 系统控制技术

Advanced Solar Energy Systems

University of Cambridge

Michael Hopper and

Professor of Renewable Energy

Energy Research

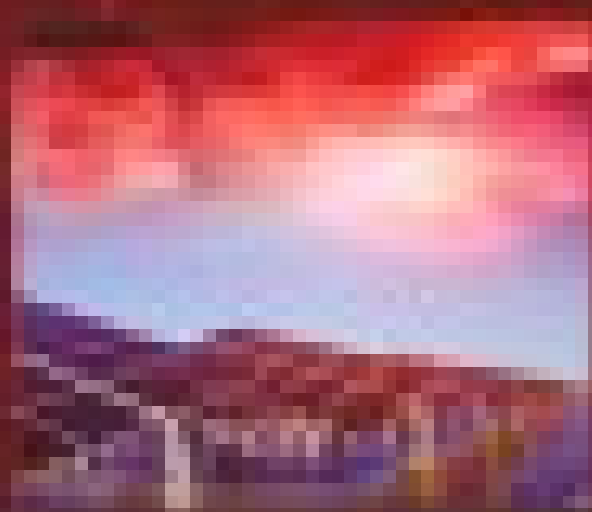
傅 强 周 强 周 强 著

傅强

周强

周强

清华大学出版社
Tsinghua University Press



国际电气工程先进技术译

太阳能发电系统控制技术

Eduardo F. Camacho

(西) Manuel Berenguel 著
Francisco R. Rubio

Diego Martínez

项安 喻志伟 魏山力 译

机械工业出版社

本书详细介绍了工业规模的太阳能发电系统, 主要是太阳能热发电系统, 包括槽式热发电和塔式热发电系统, 此外也介绍了光伏发电系统和太阳炉以及太阳能制冷系统等其他太阳能利用方式。本书详述了太阳能发电系统的相关概念、跟踪控制方法、仿真建模以及如何提高发电系统的效率, 并对具体问题进行了分析, 最后还探讨了太阳能电站并网和集成控制的问题。本书主要特点是包含了一系列的实例和仿真模型, 以欧洲最大的太阳能聚焦利用技术研究中心——西班牙阿尔梅里亚太阳能研究中心(PSA)作为实验平台, 本书介绍了实际电站中的装置和设施及其使用的控制手段, 并用大量的实际运行数据验证理论和模型。因此本书主要面向从事太阳能发电和控制工程技术领域的读者。当然, 具有控制理论和样本数据分析方面的基础知识的读者也可以把本书作为参考学习资料。

Translation from English language edition;

Control of Solar Energy Systems

By Eduardo F. Camacho, Manuel Berenguel, Francisco R. Rubio and Diego Martínez

Copyright © 2012, Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2012-4651 号。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能发电系统控制技术/(西)卡马乔(Camacho, E. F.)等著;
项安等译. —北京:机械工业出版社, 2014.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Control of Solar Energy Systems

ISBN 978-7-111-47443-2

I. ①太… II. ①卡…②项… III. ①太阳能发电-研究
IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第167018号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:刘星宁 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:马精明 责任印制:刘岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·22.25印张·464千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47443-2

定价:88.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

系列编者前言

本系列（“先进工业控制技术”）旨在促进控制工程中的技术传播。控制技术的快速发展对控制学科的各领域均有影响，诞生出了新的理论、控制器、执行机构、传感器，新的工业生产过程、计算方法，新的应用和理念，但是也带来了新的挑战。这些变化来源于工业生产过程、可行性研究和先进合作项目。本系列扩展阐述了工业控制领域各方面的发展情况，以促进控制技术更广泛和快速的传播。

发达国家出于对能源依赖、二氧化碳排放、气候变化和核电站所伴随的工程风险等问题的担忧在政治上推动优先开发可再生能源。当前已经商业化成熟的用于可再生能源发电的关键技术包括水力发电技术、潮汐能发电技术、生物能蒸煮器技术和风力发电机以及大型风电场。

利用太阳的辐射能作为系统“燃料”的太阳能发电系统应用越来越广泛。小型太阳能发电系统中常见的是给家庭热水和取暖供能的屋顶太阳能电池板，但是工业规模的太阳能发电系统又如何呢？本系列最新专题著作，由 Eduardo F. Camacho、Manuel Berenguel、Francisco R. Rubio 和 Diego Martínez 所著的《太阳能发电系统控制技术》阐述了太阳能发电系统的发展进程和控制技术。鉴于已经有很多特殊化的小规模太阳能集热器，本书中描述的电厂和装置都是工业规模的。如同当前已经出现了大容量风力发电机并集成在大型风电场中进行有效的大规模发电，太阳能聚热的基础装置也需要达到工业规模才能进行大规模发电。

本书介绍了目前两种可行的太阳能发电方式。第一种通过太阳能电池板直接产生电压。而第二种用太阳能集热器获得太阳辐射能，其主要流程架构分为两种：将局部辐射能量集中到集热管道中流通的传热流体（HTF）上，或者将太阳辐射能集中到接收塔的中央接收器上。这个简单的概念框架构成了本书的主要结构。第1章和第2章介绍了太阳能的基础知识和太阳能发电系统控制的一些基本原理；第3章介绍光伏电站的控制；第4章和第5章的重点在于槽式抛物面聚光镜的控制；第6章介绍塔式太阳能热发电系统的中央接收器及其他子系统；第7章介绍太阳能的其他应用方式（主要是太阳灶和太阳能制冷）；最后，第8章探讨了将电厂和其他设施集成到一个大规模的以市场为基础的网络中这一关键性问题。这就涉及基于发电系统日运行特性或者发电量走势图对电厂进行控制，并且还要考虑发电站集成控制的问题，为此本章也分析了上层监控过程。作者在书中一开始就提到了“电网中太阳能发电站的一体化控制是一个富有挑战性的问题”；而实际上，这是许多可再生能源发电系统中都存在的问题，同时也是系统控制理论和实践领域有望取得重大突破的方面。

IV 太阳能发电系统控制技术

本书是各种太阳能发电系统控制方面的工程知识的宝贵纲要，可以作为对这些系统有兴趣的学习者的参考书。同时这本书也是太阳能发电系统控制领域学术研究和工程实践的宝贵资料。控制领域的研究者和学习者可能会注意到，尽管第5章介绍了多种先进的控制方法，但还需要具有代表性的实例作为研究分析书中不同控制方案对问题处理能力的基准。本书另外一个特点是介绍了许多实际的发电设施。这些设施为书中介绍的控制问题解决方案提供了试验平台，从而可以通过频繁的对比试验来验证仿真结果以及分析实际情况下装置的运行状况。

1997年本系列第一本专著《Advanced Control of Solar Plants (太阳能发电站的先进控制技术)》(978-3-540-76144-6)出版，作者是 Eduardo F. Camacho、Manuel Berenguel 和 Francisco R. Rubio。过去几年中这个学科已经成熟并得到了进一步的发展。本书展示了作者和控制技术领域的研究者们持续不懈地为太阳能发电系统控制工程的发展作出的重大贡献。

工业控制中心
Glasgow, Scotland, UK

M. J. Grimble
M. A. Johnson

序 言

过去 30 年中人们从控制和优化两方面着手对如何提高太阳能发电站的效率做了大量研究。本书着重介绍了太阳能发电系统的模拟和控制技术。在此感谢阿尔梅里亚太阳能研究中心 (Plataforma Solar de Almería, PSA) 向作者提供了太阳能发电站技术试验实例, 该基地位于西班牙东南部, 是欧洲最大的太阳能聚焦利用技术研究、发展和测试中心。

本书主要面向从事太阳能和控制工程技术领域的人员, 同时也适合掌握了一定的控制技术理论和基础的数据系统知识的读者。

本书结构安排如下: 第 1 章简单介绍了太阳能的基础知识, 包括太阳辐射相关的概念和太阳能热利用技术及储能系统的分类。第 2 章提出了太阳能发电系统的控制问题, 主要探讨了太阳跟踪控制原理, 对太阳辐射估计和预测技术做了简要的概述, 并分析了基本变量的控制技术以及如何解决太阳能发电系统的集成控制问题。第 3 章简单介绍了光伏电站, 重点在自动跟踪策略。第 4 章介绍了槽式抛物面分布式集热器太阳能发电站的基本建模和控制方法, 然后分析了前馈控制、PID 控制和级联控制等基本控制算法以及它们各自的优缺点。第 5 章探讨了槽式抛物面聚光镜的先进控制技术, 包括很多已经在 PSA 试验过的控制方案, 并对这些技术进行了分类, 其中包括自适应控制、基于模型的预测控制、非线性控制、模糊逻辑控制等。第 6 章介绍了带中央接收器的太阳能塔式热发电的控制技术及主要问题, 对控制系统做了一个概述并介绍了接收器及其模型的分类, 然后探讨了定日镜控制问题和太阳定位控制策略, 给出了一些基本的控制方法。第 7 章主要是关于其他一些太阳能应用方式以及存在的控制问题, 比如太阳灶和太阳能制冷系统。最后, 第 8 章简要介绍了目前的几种太阳能发电系统集成控制方案。

本书引用了部分文献、技术报告和大学讲座的内容。

Seville, Almería
西班牙

E. F. Camacho
M. Berenguel
F. R. Rubio
D. Martínez

致 谢

感谢所有为本书的编写和出版提供帮助的个人和组织。感谢 Janet Buckley 把本书部分内容译为英文, 并帮助修改部分章节。感谢 Javier Aracil 帮助编者进入 Automatic Control 机构, 感谢其他来自各所大学的同事朋友们, 特别是 M. R. Arahal, C. Bordóns, F. Gordillo, M. G. Ortega, F. J. García-Martín, P. Lara (西班牙, 塞维利亚大学), F. Rodríguez, J. L. Guzmán, J. C. Moreno, J. D. Álvarez, C. M. Cirre, A. Pawlowski, M. Pasamontes, D. Lacasa, J. González, M. Peralta, C. Rodríguez, M. Pérez (西班牙, 阿尔梅里亚大学), L. Valenzuela, E. Zarza, L. J. Yebra, M. Romero, L. Roca, J. Bonilla, A. Valverde, D. Alarcón, R. Monterreal (西班牙, PSA—CIEMAT 研究中心), S. Dormido (西班牙, National Distance 大学), J. E. Normey-Rico (巴西, 圣卡塔琳娜州联邦大学), 书中很多观点的提出都得到了他们的帮助, 以上各位都参与了原稿的修订工作。

本书参考的大部分资料来源于由西班牙国家科学创新部、欧洲区域发展基金[⊖]、西班牙教育部[⊖]、CIEMAT、欧盟委员会[⊖]和安达卢西亚科学与创新公司资助的诸多研究项目。我们非常感谢这些组织机构提供的帮助。阿尔梅里亚大学电子机器人 (TEP-197) 研究小组发表的题为“控制系统发展与太阳能发电”的研究资料属于 PSA 与 Automatic Control 的合作协议范围之内。

本书中所述的实验都是在 PSA 及其工作人员的协助之下完成的。

最后衷心感谢家人的支持与关怀, 谢谢他们对我们工作的理解。

Seville, Almería

西班牙

E. F. Camacho

M. Berenguel

F. R. Rubio

D. Martínez

⊖ DPI2001-2380-C02-01/02, DPI2002-04375-C03-01/03, DPI2004-07444-C04-01/04, DPI2008-05818, DPI2004-06419, DPI2007-64697, DPI2010-19154, DPI2007-66718-C04-01/04, DPI2010-21589-C05-01/04。

⊖ PHB2009-0008-PC。

⊖ 加强发展太阳能技术的工业应用, 包括 EEC “大型人力资源交流”项目、EC-DGS XII “科研工作训练与交流”项目、EC-DGS XII “潜力发掘”项目, 由 CIEMAT—PSA 推广, 此外还包括属于 E. U. JOULE 工程的 DISS 项目 (合约 No. JOR3-CT98-0277)。

缩 写 词

首字母缩写

2DOF	二级自由度
AC	交流电/自适应控制
AI	人工智能
AIC	Akaike 信息准则
ANFIS	自适应模糊推理系统
ANN	人工神经网络
ARIMA	自回归综合移动平均
ARIMAX	外源输入自回归综合移动平均
ARMA	自回归移动平均
ARMAX	外源输入自回归移动平均
ARX	外源输入自回归模型
BCS	光束表征系统
BPF	带通滤波器
B/W	黑/白
CARIMA	受控自回归综合移动平均
CARMA	受控自回归移动平均
CC	级联控制
CCD	电荷耦合装置
CE	控制工作
CESA-1	阿尔梅里亚太阳能发电站 1 号
CIEMAT	环境技术与能源中心
CF	梳形滤波器
CPC	复合抛物面聚光器
CRS	塔式太阳能聚热发电系统
CSP	聚焦式太阳能发电
CSR	环日辐射
CST	太阳能聚焦
CV	单位体积控制
DAE	微分代数方程
DAPS	动态目标处理系统
DAS	数据采集系统

DC	直流电
DHA	自动离散混合
DIR	数字图像辐射计
DCS	分布式集热器系统
DES	双指数平滑法
DISS	太阳能直接蒸汽发电
DLR	德国航空航天中心
DSCF	分布式太阳能集热场
DSG	直接蒸汽发电
DTC	死区时间补偿器
ECMWF	欧洲中期天气预报中心
EHAC	扩展时域自适应控制
EPSAC	扩展预测自适应控制
ELC	扩展线性互补
EWMA	指数加权移动平均
FAM	模糊联想记忆
FF	前馈控制
FFV	前馈功能进给阀
FFNN	前馈神经网络
FIR	有限冲激响应
FIT	电力强制收购补助
FL	反馈线性化
FLC	模糊逻辑控制
FM	流程模型
FOPDT	纯滞后一阶环节
FPPI	滤波预测比例积分
FRG	调节器模糊控制
FSM	有限状态机
FVM	有限体积法
GA	遗传算法
GFS	全球预报系统
GM	增益裕度
GPC	广义预测控制
GPCIT	广义预测控制交互式工具
GPS	全球定位系统
GS	增益预置
HAC	定日镜阵列控制器

HTF	传热流体
IAE	误差绝对值积分
IAS	图像分析系统
IC	智能控制
IFPIC	增量模糊 PI 控制
IMC	内模控制
IncCond	增量电导法
I/O	输入-输出
I-PD	比例-积分-微分
IR	红外线
ISE	二次方差积分
ITAE	时间乘绝对误差积分
ITSE	时间乘二次方差积分
JD	儒略日
KBS	知识库系统
KF	卡尔曼滤波器
KFDF	基于卡尔曼滤波器的数据融合
LBL	劳伦斯伯克利实验室
LCP	线性互补问题
LQ	线性二次型
LQG	线性二次型高斯
LS	最小二乘
LTI	线性时不变
LTR	回路传输恢复技术
MBM	动边界模型
MED	多效蒸馏法
MIMO	多输入多输出
MIP	混合整数规划
MISO	多输入单输出
MIN-MAX	最小值-最大值
MLD	混合逻辑动态
MLP	多层感知器
MMPS	最大最小比例模型
MPC	基于模型的预测控制
MPP	最大功率点
MPPT	最大功率点跟踪
MRAC	模型参考自适应控制

X 太阳能发电系统控制技术

MSE	均方误差
MUSMAR	多变量广义预测自校正调节器
NARX	外源输入非线性自回归模型
NC	非线性控制
NCEP	国家环境预报中心 (美国)
NDFD	国家数字预报数据库
NEPSAC	非线性扩展预测自适应控制器
NI	数值推理
NIP	直射日射强度计
NMP	非极小相
NN	神经网络
NNC	神经网络控制器
NNLS	非负最小二乘法
ODE	常微分方程
OPC	用于过程控制的 OLE (对象链接和嵌入) 技术
OR	输出调节
ORG	优化参考调节器
PC	个人计算机
PCM	相变材料
PCS	能量变换系统
PDE	偏微分方程
PI	比例积分
PID	比例-积分-微分
PM	相位裕度
PPI	比例积分型预测
PRBS	伪随机二进制序列
PSA	阿尔梅里亚太阳能研究中心
PTC	槽式抛物面集热器
PV	光生伏打
PWA	分段仿射
P&O	扰动观察法
QFT	定量反馈理论
QP	二次规划
RBFN	径向基函数网络
RC	鲁棒控制
RLS	最小二乘
RMSE	均方根误差

RNN	递归神经网络
SAPS	静态目标处理系统
SCADA	数据采集与监视控制
SEGS	太阳能发电系统
SISO	单输入单输出
SP	史密斯预估
SPGPC	基于史密斯预估器的广义预测控制
SPSA	扰动随机逼近
SPT	太阳能发电塔
SSE	误差二次方和
SSPS	小型太阳能发电系统
STC	自校正控制
TDC	时间延迟补偿
TDL	抽头延迟线
TEP	太阳能热发电站
TP	三角划分
TPE	中点等间距三角划分
TS	训练集
TSA	太阳能空气接收器技术项目
UBB	未知但有界
UCM	隐形组件模型
UV	紫外线辐射
VS	验证集
VSCS	变结构控制系统
WRF	天气研究与预测
ZOH	零阶保持
ZN	齐格勒-尼科尔斯法

符号

N	自然数集
R	实数集
$\arg(\cdot)$	自变量
$\det(\cdot)$	矩阵行列式
$(\cdot)^T$	括号内矩阵的转置阵
I	相同维数的矩阵
$\sin(\cdot)$	正弦函数
$\cos(\cdot)$	余弦函数

$\exp(\cdot), e^{(\cdot)}$	指数函数
$\log(\cdot)$	自然对数函数
$\min(\cdot)$	集合中的最小值
$\max(\cdot)$	集合中的最大值
s	拉普拉斯变换中的复变量
z^{-1}	后移算子
z	z 变换中的前移算子和复变量
\forall	所有
$\ \cdot\ $	$C^{n \times m}$ 矩阵范数
$\ \cdot\ _2$	$L_2^{n \times m}$ 矩阵二范数
$\ \cdot\ _\infty$	无穷范数
\doteq	定义
$E[\cdot]$	期望值算子
$\hat{\cdot}$	期望值
$\bar{\cdot}$	平均值
$\hat{x}(k+j k)$	在 k 时刻得出的 $x(k+j)$ 的期望值
\wedge	逻辑与
\vee	逻辑或
\neg	逻辑或非
$equal AB$	A 等于 B
$Agt B$	A 大于 B

变量和参数表

符号	意 义	单 位	章 节
a	离散传递函数极点		4,5
	辅助传递函数(谐振的线性模型)	-	4
A	遮光板直径	m	7
A	状态矩阵		2
A_{ac}	槽区面积	m ²	7
a_f	离散传递函数极点		5
A_f	集热管道横截面积	m ²	4,5
a_{fv}	DSG 给水阀孔径	%	4
a_i	模糊集 A_i 的中点		5
A_i	模糊集		5
a_{iv}	DSG 注水阀孔径	%	4
A_m	管壁横截面积	m ²	4~6
	定日镜面积		6
a_n	定日镜方位角	rad, °	2
a_{pv}	DSG 蒸汽压力阀孔	%	4
a_s	方位角	rad, °	1,2
A_{st}	储热罐面积	m ²	7
a_t	固定的塔方位角	rad, °	2
b	辅助传递函数(谐振的线性模型)	-	4
B	收益	\$	8
B_{spot}	预计收益	\$	8
$b_{..}$	离散传递函数的分子		5
b_D	双指数平滑法中的估计趋势		2
c	辅助参数(谐振的线性模型)	m	4~6
C_f	传热流体的比热容	J/(kgK)	4~8
C_g	几何集中系数	-	2
c_m	管道材料的比热容	J/(kgK)	4~6
C_{op}	经营成本	\$	8
c_s	样本的比热容	J/(kgK)	7
	每公斤熔盐的热容量	J/K	8
d	离散死区时间	样本	4,5
D	日-地距离	km	1,2
D_0	平均日-地距离	km	1,2
D_f	内管内径	m	4,5

(续)

符号	意 义	单位	章节
D_m	管外径	m	2,4,5
D_{st}	储热罐直径	m	8
dT_f	判断是否对目标点变化敏感的阈值	K, °C	6
dT_h	判断是否对定日镜调整敏感的阈值	K, °C	6
e	普通跟踪、辨识或建模误差		5,6
	零平均值下的离散白噪声		5
E	热能	J	6
\bar{e}	绝对误差平均值		2
$\bar{e}_\%$	百分误差平均值	%	2
e_1	电价	\$	8
e_b	最高电价	\$	8
E_b	太阳能直射辐照度	W/m ²	2
E_c	太阳常数	W/m ²	1
E_d	散射辐照度	W/m ²	2
E_{ext}	地外日射辐照度	W/m ²	1
$E_{ext,h}$	与地面平行的表面的地外辐照度	W/m ²	1
E_g	总辐照度	W/m ²	2
$e_{m,in}$	DSG 进气质量流量误差	kg/s	4
e_s	最低电价	\$	8
e_{st}	储存能源价格	\$	8
E_{st}	储存能源	kJ	8
e_T	DSG 温度误差	K, °C	4
e_{xc}	偏心校正因子	-	2
f	遗忘因子的辨识算法	-	5
f_1	辅助参数	1/s	6
F_1	发电站输入滤波器		7
F_2	发电场输出滤波器		7
f_{at}	大气浊度引起的衰减系数	-	6
f_d	抛物面镜的焦距	m	2
f_{di}	漫射辐照度损耗量	-	2
g	辅助参数	1/s	6
G	集热器口径	m	4,5
g_0	离散 PI 传递函数的系数		5
g_1	离散 PI 传递函数的系数		5
G_H	气体加热器激活/关闭信号	-	7
G_{Hoff}	气体加热器关闭信号	-	7
G_{HON}	气体加热器激活信号	-	7
H	输出矩阵		2
H_{st}	储热罐损失系数	W/(m ² K)	7

(续)

符号	意 义	单 位	章 节
h_{in}	集热器入口传热流体比焓	J/kg	2,4
$h_{in,e}$	DSG 集热器入口处水的比焓	J/kg	4
h_{inj}	DSG 集热器入口注水的比焓	J/kg	4
H_1	管外部对流换热系数	W/(m ² K)	2,4~6
	总热损失系数		
\hat{H}_1	总热损失函数	J/s	4
h_n	定日镜高度角	rad,°	2
h_{out}	集热器出口传热流体的比焓	J/kg	2,4
h_{ref}	集热器出口蒸汽参考比焓	J/kg	4
h_s	太阳高度(太阳仰角)	rad,°	1,2
h_{st}	储热罐高度	m	8
h_t	塔的高度角	rad,°	2
H_t	管内对流传热系数	W/(m ² K)	4~6
I	太阳直射辐照度	W/m ²	2,4~7
	光伏电池电流	A	3
I_{CS}	日晕辐射强度	W/m ²	6
I_{MPP}	最大功率点光伏电池电流	A	3
I_{ref}	前馈控制器参考直射辐照度	W/m ²	7
I_s	定日镜反射的太阳辐照度	W/m ²	7
I_{Sun}	太阳圆面辐射强度	W/m ²	6
J	儒略日	-	1,2,6
	成本函数		5
k	离散时间	样本	2~8
K	传递函数的典型静态增益		4,5,7
k_f	传热流体的热导率	W/(mK)	4,8
K_p	PID 调节器的比例增益	-	4,5,7
l	管道长度	m	4
L	集热器回路长度或者管道长度	m	2,4~6
L	最小二乘法的增益校正		5
L_2	进口出口距离	m	4
L_{loc}	地理经度	rad,°	1
L_{PCS}	能量变换系统中的热损耗	kW	8
L_{ref}	参考经度	rad,°	1
L_{rn}	传递给制冷系统的热功率	kW	8
L_s	反射镜长度	m	7
l	距离	m	4
m	正整数-超前预测	样本	2
\dot{m}	传热流体流量	kg/s	2,5,6
\dot{m}_{12}	鼓风机 G1、G2 空气流量之差	kg/s	6