

太陽光電發電系統監測用日射計準確性研究

The Study on the Accuracy of Pyranometers for Monitoring of Photovoltaic Systems

郭育麟*

Yu-Lin Kuo

嚴坤龍*

Kun-Lung Yen

白明憲**

Mingsian R. Bai

*太陽光電科技中心 工業技術研究院

Photovoltaics Technology Center, Industrial Technology Research Institute

**國立交通大學

National Chiao Tung University

摘要

性能比為評鑑太陽光電發電系統性能好壞的重要指標，本指標之計算準確性，除了決定於發電量量測準確外，也受到設置現場日射量是否量測準確很大的影響。本研究針對3款目前常用於太陽光電發電系統性能現場監測用日射計，進行在不同日照天候下的量測準確性探討，量測結果以監測程式記錄並後續作整理與比較。

Abstract

Performance ratio is a crucial important index for the evaluation of performance of a photovoltaic system. In addition to measurement accuracy of output yield, calculation accuracy of the index depends largely on the measurement accuracy of solar irradiation. This paper presents the accuracy study of 3 pyranometers often used for PV system monitoring, in different irradiance conditions. Results are recorded by a monitoring program and then calculated and compared.

一、前言

在全球原油價格高漲與節能減碳救地球之訴求下，近年來太陽光電發電系統(Photovoltaic Power Generating System, 簡稱PV系統)逐漸受到國內公私部門的重視，無論在設置案數與累積設置容量均有大幅成長。國內從民國89年開始推廣設置PV系統，至97年7月18日止，完成設置之系統有324合約案、累積設置容量為3,129kW_p。隨著國內PV系統設置案數與容量的快速增加，系統每度電的發電成本成為一般民眾關心的議題，發電成本高低並嚴重影響民眾設置系統的意願；因此，發電系統的性能好壞便受到很高的重視。

過去國內推廣設置PV系統乃著重於示範推廣，藉由公部門（主要為中央機關、縣市政府、鄉鎮公所、各級學校）或私部門（主要為私立學校、公司行號與財團法人）之導入設置，一方面可以對一般民眾或公司行號產生示範與導引作用，另一方面經由示範推廣瞭解於台灣設置PV系統的發電情形與使用可行性。在這些過去設置的PV系統中，雖然有部份的系統安裝了日射計(Pyranometer)，但是用途主要乃為配合現場系統發電展示之需求，用以呈現即時之日照強度(Irradiance)，而非因應系統性能評估之需，故所用日射計之準確性較少受到關注。

IEC(International Electrical Commission)出版的

IEC 61724標準【1】針對PV系統之性能比(Performance Ratio, 簡稱PR)提出計算公式：

$$PR = Y_f / Y_r \quad (1)$$

其中， Y_f 為最終系統發電量(Final PV System Yield)， Y_r 為參考發電量(Reference Yield)。這裡所謂的參考發電量即為監測期間的日射量(Irradiation, Insolation)除以標準日照強度1000W/m²。以監測期間一天為例：

$$Y_r = \tau_r \times \sum_{day} G_t / G_{t,ref} \quad (2)$$

其中， τ_r 為記錄間隔， G_t 為照射在太陽光電模組表面上的日照強度， $G_{t,ref}$ 為標準日照強度1000W/m²。

性能比PR乃評鑑PV系統光能轉電能之能量轉換損失的重要指標，其影響因子包括模組溫度係數、模組表面灰塵、模組受到遮蔭情形、線損、元件匹配、變流器效率等等，也代表PV系統在設計與施工的品質；系統的性能比數值愈大，代表能量轉換損失愈低。此外，日本AIST設置了1MW_p太陽光電發電系統，Otani等人【2】就其中78套PV系統（每套容量約4kW_p）進行監測與性能評估，獲得2005年78套系統之平均性能比PR=70%。賴【3】曾針對設置於台灣北部、中部與南部各1套PV系統進行之系統每月性能比計算，由其計算結果發現，月性能比有低到68.4%，但為數不少的月份之性能比超過85%，甚至也有高達99.38%之情況。過高的性能比代表量測的誤差，以作者之經驗，日射量的量測誤差尤其是關鍵。

有鑑於PV系統設置成本目前仍高之因素，選擇日射計時應以較低購置成本、有較佳的性能表現，且符合PV系統現場監測需求為主要之考量。King等人【4】利用經驗獲得的低價位日射計光譜修正函數與太陽光入射角修正函數對該等日射計進行修正與比較其量測準確性，雖結果證明低價位日射計在感度修正後亦可具有良好的量測準確性，但各種修正係數之獲得過程較為繁瑣。本研究則著重於PV系統現場監測用低價位日射計準確性之探討，使用LP PYRA 03AC、LI-COR 200SA及MS 020VM等3款目前常用於太陽光電發電系統現場監測用日射計，進行在不同日照天候下的量測準確性探討，希望結果可供日後現場監測用日射計選用之參考。本實驗架構比照PV系統現場監測方式進行，資料蒐集以監測程式記錄並作整理與比較。該3款日射計均已被良好測試與比較量測準確性。

關鍵字：日射計、日照強度、日照射量、太陽光電、太陽光電發電系統。

二、研究方法

2-1 日射計規格

本研究共使用EKO公司之MS-802、Delta OHM公司之LP PYRA 03AC、LI-COR公司之LI-200SA，以及MESA公司之MS-020VM等4款日射計，其中，MS-802乃作為本研究之實驗參考標準，用以比對其他3款日射計之量測準確性。表1為這4款日射計的一些重要的典型規格。LP PYRA 03AC、LI-200SA，以及MS-020VM為目前PV系統現場監測常用之日射計，其中，LP PYRA 03AC與LI-200SA符合日射計標準ISO 9060【5】之Second Class等級（最低等級），但MS-020VM並未符合任何等級要求。

表 1 一些重要的日射計規格

轉換原理	熱電轉換		光電轉換	
	型號	MS-802	LP PYRA 03AC	MS-020VM
典型感度	7 mV /kW . m ⁻²	4..20mA= 0..2000 W . m ⁻²	714 mV /kW . m ⁻²	90 μA /kW . m ⁻²
響應時間	<5s	<30s	<50ms	10 μs
頻譜範圍 (nm)	305~2800	305~2800	400~1100	400~700

為瞭解本實驗參考日射計MS-802之準確性，本研究先行將它與氣象局儀校中心之Eppley PSP進行準確性比對；這2款日射計均符合日射計標準ISO 9060之Secondary Standard等級（最高等級）。此2款日射計之日照強度讀值趨勢如圖1所示，MS-802相對於PSP的整點日照強度累積誤差如圖2所示，並用詳細數據展示於表二。根據圖1與圖2結果顯示，MS-802相對於PSP的日照強度觀測總累積誤差僅-0.05%，證明MS-802足以作為研究其他日射計之比對依據。

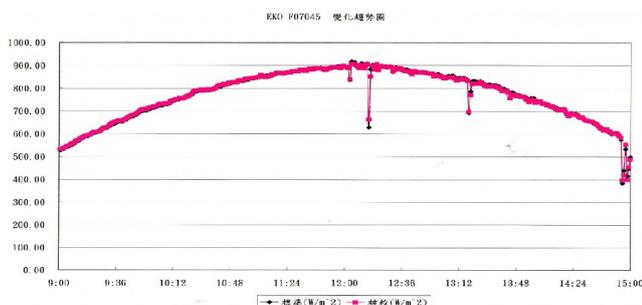


圖 1 MS-802 與 EPLAB PSP 之日照強度讀值趨勢圖

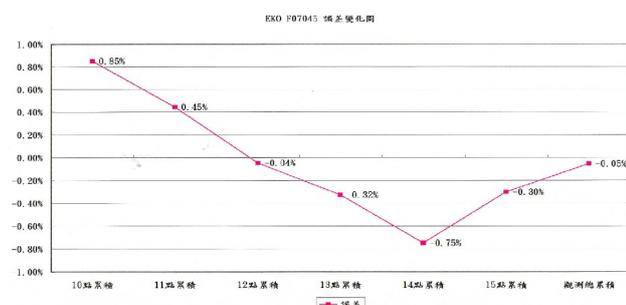


圖 2 MS-802整點日照強度累積誤差曲線

表 2 MS-802 與 PSP 之整點日照量比對誤差

日照強度累積值	標準(W/m ²)	被校(W/m ²)	相對誤差
	Eppley PSP	MS-802	
9~10點累積	37635.31	37955.90	0.85%
10~11點累積	47048.97	47259.00	0.45%
11~12點累積	52468.32	52445.00	-0.04%
12~13點累積	52863.79	52692.60	-0.32%
13~14點累積	48492.89	48131.20	-0.75%
14~15點累積	39117.01	39000.10	-0.30%
觀測總累積	277626.29	277483.80	-0.05%
平均相對誤差			-0.02%
相對誤差標準差			0.58%

2-2 監測架構與日射計擺設

如圖 3 所示，LP PYRA 03AC(電流源)及MS-020VM(電壓源)皆直接接入泓格科技I-7019R可攜式模組（類比/數位轉換器），唯有LI-200SA搭配型號2220 millivolt Adapter 147 Ohm 高精密度電阻，將類比訊號轉成數位訊號，並經由嵌入式電腦中由作者自行開發的監測程式讀取，將日照強度資料儲存至嵌入式電腦內。由於MS-802的輸出位準極低，並不適合用可攜式模組轉換訊號，故另以Campbell公司的CR850資料收集器截取與記錄MS-802的日照強度資料。為考量後續資料之比較，該嵌入式電腦與CR850資料收集器在實驗前兩者系統時間須設定成相同。為了方便日照強度之觀察與比較，本研究另以LED顯示器即時顯示待測日射計之日照強度讀值，如圖4所示。

在日射計的擺放方面，本研究考量現場日照強度的一致性，統一將此4款日射計安裝在一支撐架上，且方位角設定成正南、傾斜角設定成23.5度。正南方位角及23.5度傾斜角為台灣PV系統模組安裝常用之角度，為考慮普遍性，本研究乃採用如此之角度安排。圖5顯示日射計現場擺設之情況，擺設地點位於工研院之中興院區。

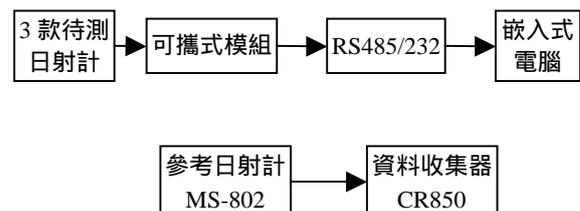


圖 3 日射計監測架構



圖4 嵌入式電腦與日照強度讀值展示



圖5 日射計現場擺設情況 (由左而右為LP PYRA 03AC、MS-020VM、MS-802、LI-200SA)

2-3 實驗方法

本研究以LP PYRA 03AC、MS-020VM及LI-200SA為待測日射計，3款待測日射計同時以一具嵌入式電腦配合自行開發之監測程式截取日照強度資料。資料透過可攜式模組傳送至嵌入式電腦並予儲存，每10秒鐘記錄一筆日照強度。此外，CR850資料收集器同樣規劃以每10秒鐘記錄一筆日照強度的方式截取MS-802的日照強度資料。

為進行不同日射計之日照強度量測準確性，本研究參考氣象局儀校中心之作法，進行日照強度累積 $G_{I,SUM}$ 之計算，配合圖6之說明，其公式如下：

$$G_{I,SUM} = \sum_{t1}^{t2} G_I = Irr1 + Irr2 + \dots \quad (3)$$

比如，“6~7點累積”即代表6~7點之間各監測記錄點的整點日照強度值之總和，此時 $t1=6+$ 、 $t2=7$ 。此外，日照強度觀測總累積即為觀測期間中各監測記錄點的日照強度值之總和。

評估太陽光電發電系統之發電性能須要用到日射量資料【1】，配合圖6之說明，日射量 H_I 計算公式如下：

$$H_I = \tau_r \times \sum_{t1}^{t2} G_I = \tau_r \times (Irr1 + Irr2 + \dots) \quad (4)$$

其中， $t1$ 與 $t2$ 乃日射量統計之起迄時間點。每天日射量乃一天完整監測期間之日射量累積，為考量實際PV系統之發電情形，一天的監測期間最好能從日升到日落，時間範圍愈寬愈佳。日射量 H_I 之單位除了用 Wh/m^2 來表示外，亦可用等效日照時數PSH (Peak Sun Hour)來表示【1】：

$$PSH = H_I / 1000 \quad (\text{單位: h}) \quad (5)$$

PSH可用來評估PV系統運轉之理想發電量，比如對一套額定容量為5kWp之PV系統，在一天PSH為5h的日照條件下，其當天理想發電量為25kWh (=5×5)。

本研究所用日射計感度值均為各日射計之出廠值。

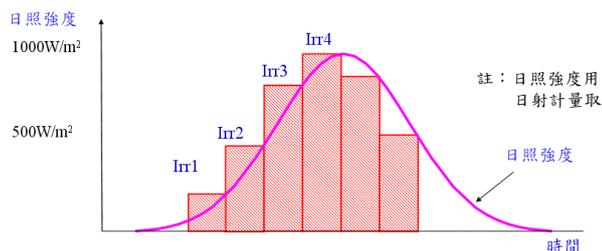


圖6 日照強度累積示意圖

本研究將分以下2種天氣情況探討：

(1) 晴朗天氣下日射計之表現探討

目的乃在探討3款待測日射計與實驗參考標準日射計MS-802之量測誤差關係。參照氣象局儀校中心之校驗方式作法，選擇一天晴朗天氣（晴朗無雲）之天氣，進行實驗組（待測日射計）與對照組（比對實驗標準MS-802）之比對測試。各整點日照強度累積算出後，繼而計算日照強度觀測總累積、觀測總累積誤差、整點誤差、平均誤差以及標準差等，以比較個別日射計之日照強度量測準確性。

(2) 不穩定天氣下日射計之表現探討

目的乃在探討日射計在不穩定天氣下（晴時多雲）的日照強度量測誤差表現，用以瞭解響應時間對量測準確性的影響，計算作法同上。

三、結果與討論

1. 晴朗天氣下日射計之表現探討

圖7為4款日射計於晴朗無雲下之日照強度讀值趨勢圖（日期為97年5月15日），由該圖可以看出LP PYRA 03AC的曲線幾乎與MS-802的曲線重疊，MS-020VM則在中、高日照下有較大之偏離（低估），而LI-200SA的表現則介於LP PYRA 03AC與MS-020VM之間，同樣在高日照下有低估之現象。

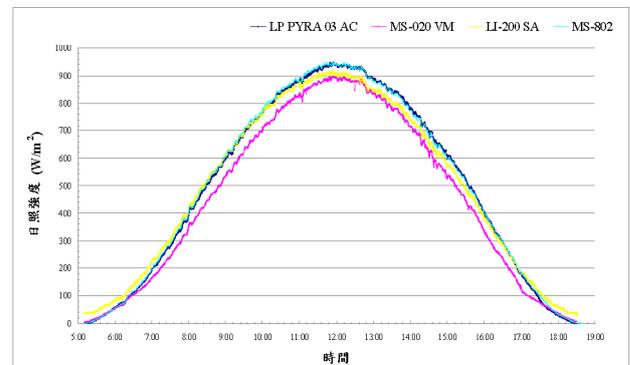


圖7 晴朗天氣下日照強度讀值趨勢圖

表3顯示LP PYRA 03AC、MS-020VM及LI-200SA分別相對於MS-802之整點日照強度累積相對誤差，及其平均與標準差之情況。就個別整點相對誤差而言，LP PYRA 03AC具有較平均之誤差表現（標準差=2.50%），LI-200SA則表現最差（標準差=8.34%）。此外，LI-200SA與MS-020VM在早晨與傍晚時段的日照強度累積誤差遠高於中午前後之時段，此乃太陽光譜在早晨（或傍晚）時段與中午前時段是不一樣的，因此2款日射計之頻譜範圍較窄，所以於早晨或傍晚時段誤差即變大。對照之下，LP PYRA 03AC頻譜範圍較寬，早晨與傍晚時段的準確性表現仍可保持在一定程度。

由表3亦可知，就日照強度觀測總累積誤差而言，LP PYRA 03AC表現最佳，其值為-0.89%，其次為

LI-200SA 的 -2.13% , MS-020VM 則居末, 其值為 -10.40%。台灣過去經常使用低價位的MS-020VM在PV系統的現場監測上, 由本研究結果可知, 於晴朗天氣下, 利用MS-020VM量測日照強度結果所計算出的日射量將嚴重低估, 進而將造成PV系統PR值的高估。

表 3 晴朗天氣下相對於 MS-802 之整點日照強度累積誤差

日照強度累積值	標準(W/m ²) MS-802	被校(W/m ²) LP PYRA 03AC	相對誤差	被校(W/m ²) MS-020VM	相對誤差	被校(W/m ²) LI-200SA	相對誤差
6~7點累積	42264.79	41836.25	-1.01%	36815.41	-12.89%	51082.30	20.86%
7~8點累積	106227.50	103483.38	-2.58%	88069.47	-17.09%	111945.68	5.38%
8~9點累積	183590.60	179390.12	-2.29%	157316.11	-14.31%	184789.73	0.65%
9~10點累積	250569.40	247515.38	-1.22%	223324.65	-10.87%	248941.18	-0.65%
10~11點累積	303028.20	298938.37	-1.35%	277481.65	-8.43%	295714.97	-2.41%
11~12點累積	332991.00	330527.50	-0.74%	312151.40	-6.26%	322072.48	-3.28%
12~13點累積	332607.00	330524.12	-0.63%	312435.29	-6.06%	317771.53	-4.46%
13~14點累積	301387.60	302576.00	0.39%	281154.62	-6.71%	288813.79	-4.17%
14~15點累積	248279.10	248334.37	0.02%	223315.41	-10.05%	236000.53	-4.95%
15~16點累積	184038.20	185288.63	0.68%	160097.48	-13.01%	175579.04	-4.71%
16~17點累積	105721.50	103883.38	-1.74%	82962.61	-21.53%	101318.01	-4.17%
17~18點累積	37059.80	33763.75	-8.89%	27182.21	-26.65%	42223.40	13.93%
觀測總累積	2427764.69	2406061.25	-0.89%	2182306.31	-10.11%	2376052.65	-2.13%
平均			-1.61%		-12.82%		1.00%
標準差			2.50%		6.36%		8.34%

2. 不穩定天氣下日射計之表現探討

自然之日照天候並非都是晴朗無雲或少雲的天氣, 有時候是晴時多雲的天氣, 圖8顯示由4款日射計量測出之晴時多雲之日照強度曲線(日期為97年4月8日)。由圖8之觀察發現, LP PYRA 03AC及MS-020VM與MS-802日照強度曲線有很高之一致性, 但是LI-200SA與MS-802日照強度曲線的一致性則較差。由圖8亦可發現, LI-200SA在低日照(100W/m²)下會有較高之誤差, 尤其是在6~7點時日照強度累積誤差竟高達53%。

如果以表4日照強度觀測總累積誤差來說, LP PYRA 03AC與MS-020VM表現差不多, 分別是2.33%與3.26%, LI-200SA的表現較差, 誤差為-8.41%、標準差為-18.35%。

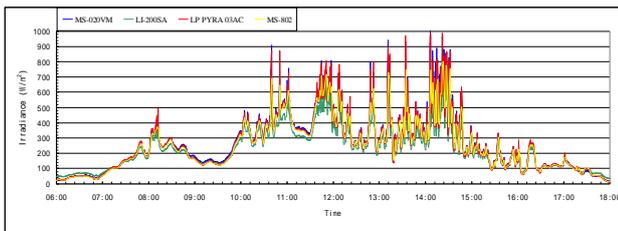


圖 8 不穩定天氣下日照強度讀值趨勢圖

表5中比較在不同天氣型態下, LP PYRA 03AC、MS-020VM及LI-200SA日射計與MS-802之等效日照時數PSH (Peak Sun Hour)相對誤差, 在晴朗天氣下, LP PYRA 03AC的相對誤差0.22%相較於其他兩款日射計, 有較小誤差。在不穩定天氣下, LP PYRA 03AC的相對誤差2.33%表現一樣突出。

表4 不穩定天氣下相對於MS-802之整點日照強度累積誤差

日照強度累積值	標準(W/m ²) MS-802	被校(W/m ²) LP PYRA 03AC	相對誤差	被校(W/m ²) MS-020VM	相對誤差	被校(W/m ²) LI-200SA	相對誤差
6~7點累積	14211.30	15199.50	6.95%	15514.29	9.17%	21743.54	53.00%
7~8點累積	53529.90	56029.50	4.67%	55412.61	3.52%	52766.96	-1.43%
8~9點累積	89478.00	92061.00	2.89%	93291.60	4.26%	82976.96	-7.27%
9~10點累積	59960.40	61758.75	3.00%	66407.56	10.75%	60086.96	0.21%
10~11點累積	143173.20	147351.00	2.92%	149586.55	4.48%	127889.62	-10.67%
11~12點累積	167217.00	172189.50	2.97%	173621.85	3.83%	147165.95	-11.99%
12~13點累積	130328.40	132075.75	1.34%	131747.90	1.09%	113619.87	-12.82%
13~14點累積	130893.00	131478.75	0.45%	132136.14	0.95%	113156.58	-13.55%
14~15點累積	158752.20	163788.00	3.17%	164768.91	3.79%	140598.23	-11.44%
15~16點累積	64654.20	65341.50	1.06%	65823.53	1.81%	59683.29	-7.69%
16~17點累積	47479.86	48025.50	1.15%	47978.15	1.05%	46251.27	-2.59%
17~18點累積	27723.30	27454.50	-0.97%	26559.66	-4.20%	29974.56	8.12%
觀測總累積	1087400.76	1112753.25	2.33%	1122848.74	3.26%	995913.80	-8.41%
平均			2.47%		3.37%		-1.51%
標準差			2.07%		3.89%		18.35%

表 5 不同天氣型態下 PSH 相對誤差表

天氣型態	日射計	MS-802	LP PYRA 03AC	MS-020VM	LI-200SA
不穩定天氣	PSH	3.02	3.09	3.12	2.77
	相對誤差	reference	2.33%	3.26%	-8.41%
晴朗天氣	PSH	6.74	6.76	6.12	6.60
	相對誤差	reference	0.22%	-9.21%	-2.13%

太陽光電發電系統可由性能比(Performance Ratio;PR)【1】作為評估的標準, 一般而言0.7~0.8是合理性能比。性能比過低反應出PV系統效率不佳, 反之, 性能比過高代表監測量測異常。不管性能比過低或偏高, 影響性能比其中一個重要因素就是日照強度(日射量)準確性。

根據表5, 晴朗天氣下, MS-020VM的相對誤差高達-9.21%, 因此造成性能比偏高。圖10為中部5.04kWp某一PV監測系統97年4月至7月底之性能比。該監測系統於97年5月之前(包含5月份)使用MS-020VM作為日照強度量測。97年4月性能比89.34%及97年5月性能比86.66%, 超出合理值範圍。但於97年6月更換日射計後, 性能比落於0.7~0.8是合理範圍內。

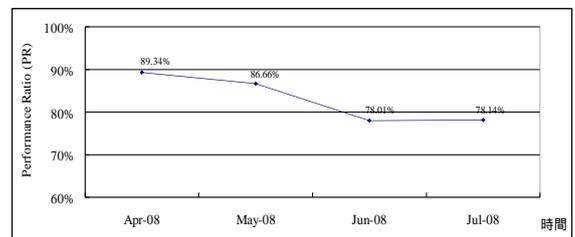


圖10 更換日射計後性能比圖

四、結論

根據圖3、圖4實驗測試架構下, 本研究已完成LP PYRA 03AC、MS-020VM、LI-200SA與用來比對校驗用MS-802的相對誤差比較。在晴朗天氣下, LP PYRA 03AC的觀測總累積相對誤差為-0.89%遠低於LI-200SA之-2.13%及MS-020VM之-10.11%。另外, 於不穩定天氣下, LP PYRA 03AC之觀測總累積相對誤差2.33%也低於MS-020VM及LI-200SA。同樣地, 對於等效日照時數PSH (Peak Sun Hour)相對誤差差異, LP PYRA 03AC低於MS-020VM甚至LI-200SA, 表現最佳。由本研究結果發現, 低成本之三款日射計中, LP PYRA 03AC符合IEC 61724【1】日照強度量測誤差<5%之要求, 也是三款低成本日射計中, 表現最好的。

五、參考文獻

[1]IEC 61724:1998, Photovoltaic system performance monitoring -

Guidelines for measurement, data exchange and analysis.

- [2]Kenji Otani; Takumi Takashima; Kosuke Kurokawa, Performance and Reliability of 1 MW Photovoltaic Power Facilities in AIST, Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Volume 2, May 2006, pp. 2046-2049
- [3]賴彥任, 2006 年太陽光電監測資料分析, 工業材料雜誌, 第 245 期, 民國 96 年 5 月, pp.145-152。
- [4]D.L. King, W.E. Boyson, B.R. Hansen, and W.I. Bower, Improved Accuracy For Low-Cost Solar Irradiation Sensors, Presented at the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6-10 July 1998, Vienna, Austria.
- [5]ISO 9060:1990, Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.

論文題目	太陽光電發電系統監測用日射計準確性研究
論文領域： (請勾選適當領域)	<input type="checkbox"/> (1) 電池技術 <input type="checkbox"/> (2) 照明技術 <input type="checkbox"/> (3) 電力品質 <input type="checkbox"/> (4) 馬達驅動 <input type="checkbox"/> (5) 電磁干擾技術 <input type="checkbox"/> (6) 電力電子市場 <input type="checkbox"/> (7) 電力電子控制 <input type="checkbox"/> (8) 綠色能源應用 <input type="checkbox"/> (9) 新元件、新產品、新應用 <input type="checkbox"/> (10) 電源轉換及調節技術 <input type="checkbox"/> (11) 電力電子數位應用技術 <input type="checkbox"/> (12) 其他電力電子相關主題
聯絡人	郭育麟
職稱	副工程師
作者	郭育麟 嚴坤龍 白明憲
聯絡地址	(31040)新竹縣竹東鎮中興路 4 段 195 號 22-1 館 284 室
聯絡電話	(03)5913889
傳真	(03)5820218
電子郵件帳號	kuoyl@itri.org.tw
國科會計畫編號	

授權書

本授權書所授權之論文為本人郭育麟投稿2008年9月5

日於崑山科技大學舉辦之2008第七屆台灣電力電子研討會論文。

論文名稱：太陽光電發電系統監測用日射計準確性研究

同意 不同意

本人具有著作財產權之論文全文，授予主辦單位，後收錄於該主辦單位發行之光碟和論文集，並得以修改投稿論文中錯字及不適當詞句內容、數學公式後，不限地域、時間與次數，以光碟和紙本重製並於舉辦當日發行。

上述授權內容均無需訂立讓與及授權契約書，依本授權之發行權為非專屬性發行權利，依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。

作者簽名：
(親筆正楷)

2008年 7 月 31 日