

一种光源空间角度的测量方法

王 江

(成都信息工程学院中国气象局大气探测重点实验室, 四川成都 610225)

摘 要: 基于光的直线传播特性, 提出一种用多面体不同面上的传感器来测量光源空间角度的方法. 通过建立等效矢量模型, 将光源空间角度的测量变换为空间几何模型中几何角度的计算, 降低了测量的复杂度, 测量范围包括光源与检测点间的方位角和俯仰角, 解决了现有技术测量范围不全的问题, 适合在空中或地面对光源空间角度的测量. 通过对太阳角度的实测分析, 验证了方法的正确性和可行性.

关键词: 光源空间角度; 测量方法; 多面体; 矢量模型

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 11-2692-04

A Measuring Method of Light Source Angles

WANG Jiang

(CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: A method of measuring light source angles is presented based on the optical line transmission characteristic. The sensors on the polyhedron flats to measure light source angles are applied. The light source angles measuring is changed into the geometry angles computing in the space geometry by means of constructing equivalent vector model, so that the measurement is simplified. The azimuth and the pitching angle between light source and the measured point are included in the measuring method. At the same time, this method is suitable for light source angles measurement in the sky or on the ground. In this way, the prior measurement range insufficient is resolved. The results of the measurement for solar angle prove that the method is correct and feasible.

Key words: light source angles; measuring method; polyhedron; vector model

1 引言

光源空间角度的测量在航天、自动控制等许多技术领域有着广泛应用, 如在航天技术中, 通过对太阳方位角的测量以获得航天器的姿态; 在自动控制技术中, 通过对光源角度的精确测量, 使太阳能设备等装置自动跟踪光源角度工作.

目前, 在航天技术中, 太阳光入射角的测量方法很多^[1,2], 随着光传感器技术的进步^[3], 其测量精度和量程范围都有很大提高, 如文献[2]的测量范围达 $\pm 64^\circ$, 精度优于 0.02° , 但由于测量原理上的限制, 这些方法很难同时满足高精度和满量程的测量性能要求.

在太阳能应用中, 太阳角度(或太阳位置)的实时测量对提高发电效率尤为重要. 目前, 在太阳能跟踪系统中, 倾向于开环定位跟踪, 它根据地理位置与当地时间, 用控制器计算太阳位置, 以此做出跟踪控制策略. 系统跟踪精度受所用太阳角度算法^[4~7]影响, 较差的算法在长时间运行后可能产生较大误差, 算法好的精度虽高,

但运算量很大, 对控制器性能要求高, 因此, 其精度受制于成本控制. 同时, 太阳角度算法需已知经纬度和时间信息, 因此, 它也不适用于航空中对太阳角度的实时跟踪.

本文提出一种用多面体上不同面上的光传感器或装置来测量光源空间角度的方法, 其算法简单, 测量范围全面, 满足在空中和地面对光源空间角度的测量.

2 光源空间角度测量原理及方法

为便于描述, 定义以下用语:

(1) 光源入射能量: 光源投射到与光源入射光线相垂直的平面上的单位面积上的辐射能量;

(2) 光源在某平面上的入射能量: 光源投射到此平面上的单位面积上的辐射能量;

(3) 光源在某平面上的入射角度: 光源入射光线与该平面的夹角;

(4) 光源入射矢量: 以光源入射方向为方向, 光源入射能量为模的矢量.

由光的直线传播特性,光源入射能量、光源在平面上的入射能量与入射角度之间存在三角函数关系.如图 1 所示,由于光源入射光线平行投射在 A 平面上的有效面积与投射到 B 平面上的相同,因此其投射在两平面上的辐射能量相等,得 $W_A = W_{\max} \sin\beta$,其中 W_{\max} 为光源入射能量, W_A 和 β 分别为光源在 A 平面上的入射能量和入射角度.

由光源入射能量、光源在平面上的入射能量与入射角度之间的关系,在矢量空间,为它们建立等效模型,将它们之间的关系简化为矢量与矢量间的关系.如图 1,将光源入射矢量 W 分解为垂直于 A 平面的垂直分矢量 W_v 和平行于 A 平面的平行分矢量 W_h ,则光源在 A 平面上的入射角度 β 等效为 W 与 W_h 的夹角,光源在 A 平面上的入射能量等效为 W_h 的模.

光源空间角度测量原理:假定光源的入射光线满足相互平行或相互间的角度很小、近似平行的条件,由光的直线传播特性,光源投射到多面体上各平面上的能量及它与平面间的角度关系可用空间几何矢量模型来等效,其光源投射在多面体各面上的能量可等效为光源入射矢量垂直于各平面上的垂直分矢量的模.此时,对于 $M > 5, N > 2$,且 $M > N$ 的某些多面体,当光源投射在多面体各面上的能量已知,光源与检测点间的空间角度(方位角和俯仰角)可由等效模型计算而得,同时可得光源投射能量.其中, M 为多面体面数, N 为多面体被光源同时照射的面数.

实际应用中,当光源与测量装置距离足够远时,则测量原理中条件成立,多面体可选用正 K 棱柱体($K > 3$)等,多面体各面上的能量可由光传感器或装置来感应获取.下面以正方体为例,对测量方法分步说明:

第一步,如图 2 所示,建立以正方体中心点 O 为原点的空间直角坐标系.

第二步,在建立的直角坐标系上,建立任意光源 P 的空间角度与入射矢量的几何矢量等效模型,如图 3 所示,由等效模型推导光源空间角度计算公式:

令光源 P 的入射矢量为 E ,方向由光源 P 指向点 O . E 分解在空间直角坐标系 x, y 和 z 坐标轴上的分矢量分别为 E_x, E_y 和 E_z ,其中 $E_x \perp YOZ$ 平面, $E_y \perp XOZ$ 平

面, $E_z \perp XOY$ 平面.光源 P 在 XOY 平面上的投影为点 P' , E_{xy} 为 E 在 XOY 平面上的投影, E_{xy} 分解在 x, y 轴上的分矢量分别为 E_x 与 E_y .定义 E 的反方向与 z 轴正向间的夹角为俯仰角 φ , P' 在 XOY 平面直角坐标系上与 x 轴正向夹角为方位角 θ ,则光源 P 的空间角度由 φ 和 θ 组成, φ 和 θ 的取值范围分别为 $[0, 180^\circ]$ 和 $[0, 360^\circ]$.当 $E \perp XOY$ 平面时,定义 θ 为 0° , φ 为 0° 或 180° .

令 E_x, E_y, E_z, E_{xy}, E 的模分别为 e_x, e_y, e_z, e_{xy}, e , 由图 3 得:

$$\varphi = \arccos(e_z/e) \tag{1}$$

$$\theta = \arccos(e_x/e_{xy}) \tag{2}$$

其中 $e = \sqrt{e_{xy}^2 + e_z^2}, e_{xy} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$.式中 φ 的取值范围为 $[0, 90^\circ]$,其在 $[0, 180^\circ]$ 范围内的取值由光源 P 的位置确定:当光源 P 在 XOY 平面与 z 正轴构成的空间内,取值为 φ ,范围为 $[0, 90^\circ]$;当光源 P 在 XOY 平面上或在 XOY 平面与 z 负轴构成的空间内,取值为 $180^\circ - \varphi$,范围为 $[90^\circ, 180^\circ]$.式中 θ 的取值范围为 $[0, 90^\circ]$,其在 $[0, 360^\circ]$ 范围内的取值由光源投影 P' 的位置确定:当 P' 分别位于第一象限或 x 正轴、第二象限或 y 正轴、第三象限或 x 负轴、第四象限或 y 负轴时, θ 取值范围分别为 $[0, 90^\circ], [90^\circ, 180^\circ], [180^\circ, 270^\circ]$ 和 $[270^\circ, 360^\circ]$;由图 2、图 3 可知, E_x, E_y, E_z 分别垂直于正方体被光源 P 照射的三个相互垂直的平面,因此, e_x, e_y, e_z 为光源投射到正方体上被光源 P 照射的三个平面上的能量.

第三步,在图 2 的正方体表面安装光传感器,确定光传感器在正方体上的位置,建立它们的位置映射表;测量各光传感器对光源的感应特性,建立各光传感器感应光源输出的信号强度与光源入射能量之间的映射表.

最后,采集正方体上光传感器输出的感应信号,利用光传感器被光源照射与未被照射输出的感应信号的差异,提取被光源照射平面上光传感器输出的感应信号,使用感应特性表和位置映射表,将它们代入式(1)、(2),计算出光源 P 的 e, φ 和 θ .

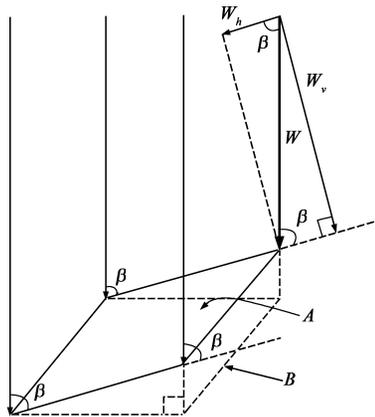


图1 光源入射矢量与入射角度关系图

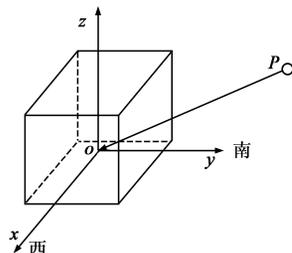


图2 以正方体中心为原点的空间直角坐标系

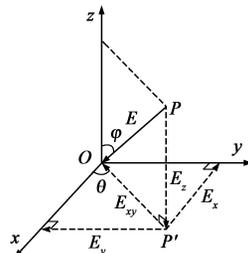


图3 光源空间角度与入射矢量的等效模型

3 实测分析

本文通过分析实测得到的地平坐标系上的太阳方位角 γ 和高度角 h ^[8] 与其真实值的吻合度来验证测量

方法的正确性. 其中, γ 和 h 的实测值由实测得到的太阳空间角度的 θ 和 φ 分别求得, 为简化 γ 和 h 的求值, 太阳方位角取正东为 0° , 正西为 180° , 在实测中, 使图 3 中的 XOY 平面与地平面平行且 x 与 y 正轴分别指向正西和正南, 得 $h = 90^\circ - \varphi$, $\gamma = 180^\circ - \theta$; γ 和 h 的真实值用由式(3)~(5)^[4~7]计算得到的值近似.

$$\sin(h) = \sin(\psi)\sin(\delta) + \cos(\psi)\cos(\delta)\cos(t) \quad (3)$$

$$\sin(\gamma) = \frac{\cos(\delta)\sin(t)}{\cos(h)} \quad (4)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\sin(h)\sin(\psi) - \sin(\delta)}{\cos(h)\cos(\psi)} \quad (5)$$

其中, h 为太阳高度角, γ 为太阳方位角, ψ 为当地经纬度, 太阳时角 t 和赤纬角 δ 用文献[7]的公式计算.

实测装置多面体为正方体, 光传感器为同一型号的太阳能电池, 以正方体中心为原点建立的空间坐标系如图 2, 其 XOY 平面与地平面平行且 x 与 y 正轴分别指向正西和正南, 几何矢量等效模型如图 3, φ 和 θ 由式(1)、式(2)计算, h 和 γ 用关系式 $h = 90^\circ - \varphi$ 、 $\gamma = 180^\circ - \theta$ 计算. 因太阳能电池输出的短路电流与光照强度近似线性变化^[8,9], 实测中用其输出的光电流代替感应的入射能量来计算太阳角度. 为减小测量环境中太阳散射和地物反射对测量结果的干扰, 选正方体侧面未被太阳直射的电池来估测侧面太阳散射与地物反射, 实测中选正方体东西两面电池来交替测量; 对于顶面太

阳散射估测, 实测中用与正方体顶面电池相同放置的一块电池来测量, 测量时用挡板为其挡住太阳直射光.

实测结果如图 4 所示, 日期为 2010 年 11 月 22 日, 经纬度为 $103^\circ 59'$ 和 $30^\circ 35'$, 天气为多云转晴, 图中虚短线为实测计算得到的太阳方位角和高度角的实测值, 实线为由经纬度和时间计算得到的计算值. 如图 4(a) 所示, 太阳方位角的实测值与计算值的曲线吻合良好, 两者偏差如图 4(b) 所示, 从 11:00 到 12:40, 因实测环境因素使得辐射在正方体东、南、西三面上的太阳散射和地物反射的能量偏差增大, 使得正方体各侧面上太阳散射与地物反射的实际值与实测值的偏差增大, 导致方位角度偏差增大; 在其它时间, 正方体各侧面上的太阳散射与地物反射的实际值与实测值的偏差较小, 对测量值影响较小, 实测值与计算值偏差在 1° 范围内. 如图 4(c) 所示, 高度角的实测值与计算值的曲线吻合良好, 两者偏差如图 4(d) 所示, 实测值与计算值偏差在 1° 范围内, 在 11:00 到 12:40 时段, 高度角偏差增大, 其原因与方位角此时偏差变大原因相同; 17 点以后因太阳直射分量在太阳能电池上的感应电流很小使得偏差增大.

综上所述, 太阳角度实测值与计算值吻合良好, 验证了测量方法正确可行, 其中, 由于实测中对地物反射和天气散射采用的滤除方法比较简单, 使得实测误差较大.

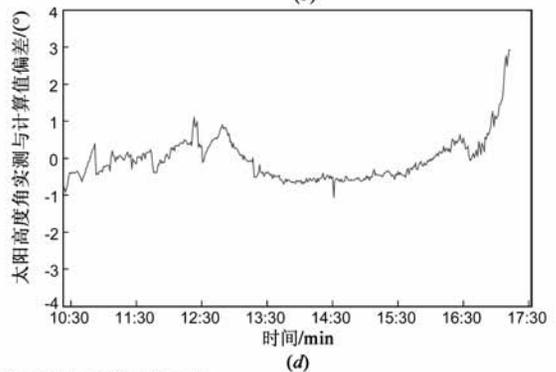
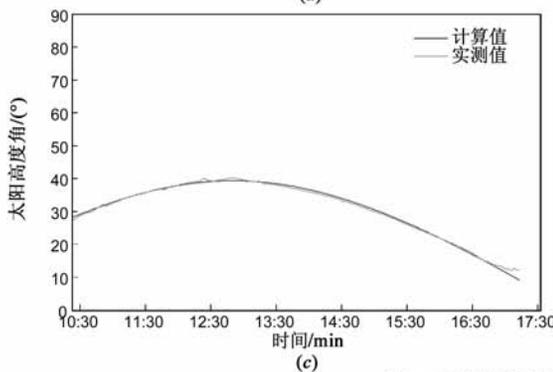
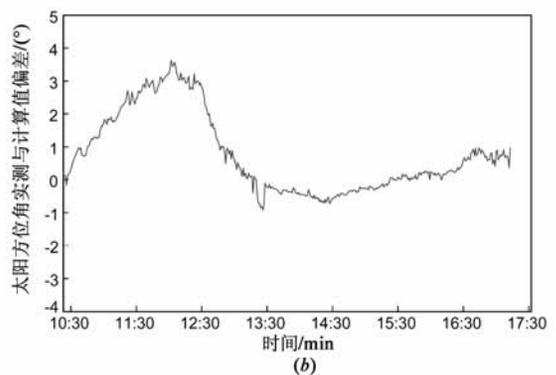
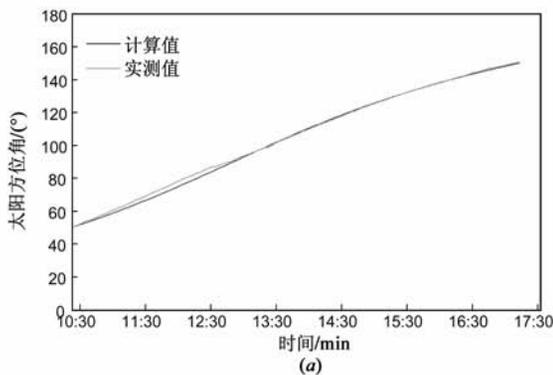


图4 太阳高度角和方位角实测与计算曲线对比

4 结束语

本文为光源空间角度提供了一种算法简单,测量范围全面,实现成本低,应用面广的测量方法.通过对太阳角度的实测,证明了方法的正确性及可行性.从理论上推断,此方法在大气层外对太阳角度的测量可获得较高精度,但需实验验证;反之,在地物反射较大或天气较差的环境,对地物反射和大气散射的滤除程度对精度影响较大,滤除程度越好,精度越高,今后将围绕如何有效滤除地物反射和大气散射作进一步的研究.

参考文献

- [1] 陈非凡,陈益峰.采用光学非线性补偿的两轴微型太阳敏感器[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(2):197-200.
- [2] 陈非凡,洪志伟.基于光学游标测量原理的平行光入射角度测量方法[J].清华大学学报(自然科学版),2006,46(8):1401-1404.
- [3] 周鑫,朱大中.新型集成阵列四象限 CMOS 光电传感器的研制[J].电子学报,2005,33(5):928-930.
ZHOU Xin, ZHU Da-zhong. Research of a new integrated arrayed 4 quadrants CMOS photo-electric sensor[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 928-930. (in Chinese)
- [4] WALRAVEN R. Calculating the position of the sun[J]. Solar Energy, 1978, 20(5): 393-397.
- [5] BRAUN J E, MITCHELL J C. Solar geometry for fixed and tracking surfaces[J]. Solar Energy, 1983, 31(5): 439-444.

- [6] REDA I, ANDREAS A. Solar position algorithm for solar radiation applications[J]. Solar Energy, 2004, 76: 577-589.
- [7] 王炳忠,刘庚山.日射观测中常用天文参数的再计算[J].太阳能学报,1991,12(1):27-32.
WANG Bing-zhong, LIU Geng-shan. Improvement in the astronomical parameters computation for solar radiation observation [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1991, 12(1): 27-32. (in Chinese)
- [8] 杨金焕,于化丛,郭亮.太阳能光伏发电应用技术[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [9] 姜琳.太阳能电池基本特性测定实验——一个与能源利用有关的综合设计性实验[J].大学物理,2005,24(6):52-55.
JIANG Lin. The determining experiment of basic characteristics of solar battery - A comprehensive design experiment related to energy usage[J]. Acta College Physics, 2005, 24(6): 52-55. (in Chinese)

作者简介



王 江 男,讲师,1977年4月出生于贵州开阳,2004年毕业于电子科技大学通信与信息系统专业,现在成都信息工程学院工作,从事信号处理、嵌入式系统研究.

E-mail: rivers2000@126.com