维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号：1000-7709(2008)02-0201-04

高精度太阳位置算法及在太阳能发电中的应用

马 健 向 平

（西北工业大学 机电学院，陕西 西安 710072）

摘要：在主动式跟踪太阳能发电系统中，要求精确计算太阳位置以实现跟踪并提高发电效率。根据 Jean Meeus《天文算法》计算天体的方法给出了计算太阳位置的具体方法，得出太阳位置的累计误差不超过±0.000 3°，完全满足太阳跟踪的需要。应用此算法计算了太阳赤经和赤纬，并对结果进行了比较。太阳能发电应用实例表明，该方法计算精度高，误差小，易编程。

关键词：太阳能；太阳赤经；太阳赤纬；水平角；高度角

中图分类号：TK51.4；TK511 **文献标志码**：A

实现全自动跟踪太阳能发电不仅能提高太阳能的利用率，而且也是太阳能发电的发展趋势[1]。目前，跟踪太阳较多采用方位—俯仰双轴跟踪系统，以垂直于地面的轴为方位轴，以平行于水平面的轴为俯仰轴，根据程序计算的太阳位置分别控制两部电机在水平面和铅锤面内驱动各自转轴转动到需要角度，从而达到跟踪目的。因此，精确计算太阳位置就成为关键[2,3]。本文全面论述了基于《天文算法》[4]的一种精确计算方法，依据行星黄道坐标参数 VSOP87 计算任意时刻地球表面任一点太阳位置。该方法易编程、精度高、误差小，完全能满足太阳能发电的需要。

1 时间系统

1.1 力学时

在天文年历中，根据理论力学计算天体位置用的时间引数为均匀时间。由于世界时并非均匀不变，因此从 1984 年起天文年历中太阳、月亮和大行星各基本历表的时间引数采用力学时代替历书时。本文计算中，时间引数均为力学时。若将某地的地方时转化为力学时，其方法为：

$$\begin{cases}\text{世界时}=\text{地方时}-\text{所在时区}/24\\ \text{力学时}=\text{世界时}+\Delta T\end{cases} \quad (1)$$

其中，某点的地理经度以东经为正，西经为负。

式中，ΔT 为世界时换算为力学时的改正值，事先无法获得精确的长期推测值，2007 年天文年历采用 +66 s[5]。

1.2 儒略日及儒略世纪

采用 J2 000.0 作为起算点，对给定的世界时儒略日为：

$$JD=367Y-\mathrm{INT}(7(Y+\mathrm{INT}((M+9)/12))/4)+\mathrm{INT}(275M/9)+D+1\ 721\ 013.5+t \quad (2)$$

式中，Y 为年数；M 为月数；D 为日数；t 为世界时；INT 表示取整。

从 2000 年算起的儒略世纪为：

$$JC=(JD-2\ 451\ 545)/36\ 525 \quad (3)$$

天文年历里的力学时 T 为：

$$\begin{cases}JDE=JD+\Delta t/86\ 400\\ T=(JDE-2\ 451\ 545)/365\ 250\end{cases} \quad (4)$$

式中，JD、JC、JDE 分别为儒略日、儒略世纪和以力学时计算的儒略世纪。

2 太阳的黄经、黄纬和向径

2.1 黄道坐标系

黄道坐标系是一种天球坐标系，以地球公转的平均轨道为黄道面，与天球相交的大圆称为黄道。黄道坐标系较适合表示太阳系内的天体位置和运动特征。

收稿日期：2007-12-12，**修回日期**：2007-12-26

作者简介：马健（1979-），男，硕士研究生，研究方向为机电一体化、嵌入式技术，E-mail：majian@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者：向平（1963-），女，副教授，研究方向为生物医学工程理论和应用、自动检测技术、微机应用等，E-mail：xiangping@nwpu.edu.cn

维普资讯 http://www.cqvip.com

2.2 地球黄道经度 L、黄纬 B 和向径 R

$$L_{0_i}=A_i\cos(B_i+C_iT) \tag{5}$$

$$L_0=\sum_{i=0}^{n}L_{0_i} \tag{6}$$

式中，A_i、B_i、C_i 分别为星历表中第 i 行 A、B、C 的值[6]；n 为总行数，对 L_0 共 64 行，$L_1\sim L_5$ 的计算方法与 L_0 相同。

$$L=(L_0+L_1T+L_2T^2+L_3T^3+L_4T^4+L_5T^5)\times10^{-8} \tag{7}$$

以同样方法可计算地球黄纬 B(弧度)和向径 R(无单位)。

2.3 太阳黄经、黄纬和向径

在黄道坐标系内，以地球为参考点，则太阳黄经 L'、黄纬 B' 和向径 R' 为：

$$\begin{cases}L'=L+180^\circ\\B'=-B\\R'=R\end{cases} \tag{8}$$

3 太阳视赤经和太阳视赤纬

3.1 黄经章动 $\Delta\Psi$ 和交角章动 $\Delta\varepsilon$

(1)日月平角距。

$$X_0=297.850\ 36+445\ 267.114\ 80t-0.001\ 914\ 2t^2+t^3/189\ 474$$

(2)太阳平近点角。

$$X_1=357.527\ 72+35\ 999.050\ 340t-0.000\ 160\ 3t^2-t^3/300\ 000$$

(3)月亮平近点角。

$$X_2=134.962\ 98+477\ 198.867\ 398t+0.008\ 697\ 2t^2+t^3/56\ 250$$

(4)月亮平升交点距 。

$$X_3=93.271\ 91+483\ 202.017\ 538t-0.003\ 682\ 5t^2+t^3/327\ 270$$

(5)月亮升交点平黄经。

$$X_4=125.044\ 52-1\ 934.136\ 261t+0.002\ 070\ 8t^2+t^3/450\ 000$$

根据章动模型 IAU2000 的计算方法，则有：

$$\Delta\psi_i=(a_i+b_it)\sin\left(\sum_{j=0}^{4}X_iY_{ij}\right) \tag{9}$$

$$\Delta\varepsilon_i=(c_i+d_it)\cos\left(\sum_{j=0}^{4}X_jY_{ij}\right) \tag{10}$$

其中，$t=10T$。

式中，a_i、b_i、c_i、d_i、Y_{ij} 为常整数，分别为第 i 行的 a、b、c、d 值；Y_{ij} 的意义相同[6]。根据精度可选择行数，选择前 60 行的计算结果完全满足要求，见表 1。则黄经章动(°)为：

$$\Delta\psi=\sum_{i=0}^{n}\Delta\psi_i/36\ 000\ 000 \tag{11}$$

交角章动(°)为：

$$\Delta\varepsilon=\sum_{i=0}^{n}\Delta\varepsilon_i/36\ 000\ 000 \tag{12}$$

3.2 太阳视黄经 λ 和黄赤交角 ε

(1)黄经的光行差改正(°)。

$$\Delta\tau=20.489\ 8/(3\ 600R)$$

(2)平黄赤交角(°)。

$$\varepsilon_0=84\ 381.448-4\ 680.93u-1.55u^2+1\ 999.25u^3-51.38u^4-249.67u^5-39.05u^6$$

其中，$u=T/10$。

太阳视黄经为：

$$\lambda=L'+\Delta\psi+\Delta\tau \tag{13}$$

黄赤交角为：

$$\varepsilon=\varepsilon_0+\Delta\varepsilon \tag{14}$$

3.3 太阳赤经 α 和太阳赤纬 δ

太阳赤经和太阳赤纬是指在第二天球坐标系中度量的，因此由太阳黄经和黄纬转换为太阳视赤经和视赤纬需经过坐标转换。

太阳视赤经为：

$$\alpha=\arctan\left(\frac{\sin\lambda\cos\varepsilon-\tan B'\sin\varepsilon}{\cos\lambda}\right)$$

太阳视赤纬为：

$$\delta=\arcsin(\sin B'\cos\varepsilon+\cos B'\sin\varepsilon\sin\lambda)$$

由上述方法计算出 2007 年每月 1 日零时(力学时)太阳赤经和太阳赤纬(表 1)，并与《2007 年天文年历》的结果比较，见图 1。

表 1 2007 年每月 1 日零时太阳视赤纬和太阳视赤经

Tab.1 Solar apparent declination and solar apparent right ascension on zero, the first day of every month of 2007

日 期	太阳视赤经/s	太阳视赤纬/(°)	日 期	太阳视赤经/s	太阳视赤纬/(°)
1 月 1 日	67 456.002 40	−23.050 60	7 月 1 日	23 902.715 1	23.147 30
2 月 1 日	75 406.224 20	−17.269 30	8 月 1 日	31 397.040 0	18.165 50
3 月 1 日	81 971.792 50	−7.813 55	9 月 1 日	38 363.052 1	8.496 68
4 月 1 日	2 402.176 88	4.309 66	10 月 1 日	44 839.550 9	−2.952 17
5 月 1 日	9 082.827 70	14.896 60	11 月 1 日	51 793.520 5	−14.233 50
6 月 1 日	16 445.938 96	21.972 90	12 月 1 日	59 196.469 7	−21.706 10

注：计算时章动常数取前 60 项。

维普资讯 http://www.cqvip.com

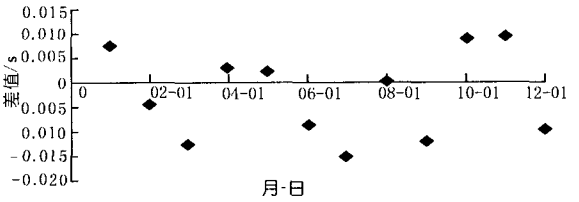


图 1　太阳赤经计算结果与天文年历值比较

Fig.1　Comparison of calculation results for solar right a scension and astronomical ephemeris values

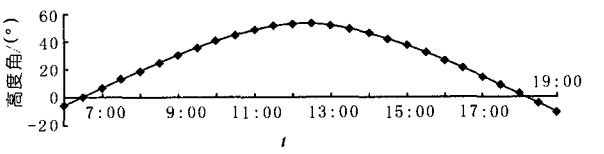


图 2　西安市 2007 年 10 月 1 日太阳高度角变化

Fig.2　Solar altitude angle changes on Oct.1,2007,Xi'an

由图 1 可知，太阳赤经的计算结果与天文年历值十分接近，最大差值≤0.01 s。以同样方法比较太阳赤纬计算结果，最大差值≤0.03 s 。

3.4　太阳时角计算

(1) 格林尼治平太阳时。

$$s_0=280.460\,618+360.985\,65(J_D-2\,451\,545)+0.000\,387\,9J_C^2$$

(2) 格林尼治视太阳时。

$$s=s_0+\Delta\psi\cos\varepsilon$$

(3) 某地太阳时角。

$$S=s-\alpha+l_{on}$$

式中，l_{on}为当地的地理经度，东经为正，西经为负。

4　应用

4.1　太阳方位角和当地太阳高度角

在方位－俯仰双轴太阳能发电中，由两步电机跟踪太阳的方位角和俯仰角[7]，因此还需计算对地球表面某点某时刻的太阳高度角和太阳方位角。由于太阳视赤经和太阳视赤纬计算太阳高度角和太阳方位角，是由赤道坐标系向地平坐标系的转换过程。

太阳高度角：

$$\sin h=\sin\delta\sin l_{at}+\cos\delta\cos l_{at}\cos S$$

太阳方位角：

$$\tan A=\sin S/(\cos S\sin l_{at}-\tan\delta\cos l_{at})$$

式中，δ为太阳视赤纬；l_{at}为当地地理纬度，北纬为正；S 为太阳时角。

利用上述方法计算出西安市 2007 年 10 月 1 日(经度＋108.860 2°，纬度＋34.161 3°)太阳高度角的变化如图 2 所示。

4.2　在太阳能发电中的应用

由图 2 可知，太阳 1 d 中高度角变化并不均匀，变化范围≤60°。通过计算表明，西安市 1 a 中太阳高度角≤80°，因此在跟踪太阳发电中跟踪高度角在 0°～80° 之间变化就可满足跟踪要求。1 a 中，太阳每天升起的时间和方位并不相同，例如 1 月 1 日与 7 月 1 日太阳升起的时间相差约 1 h，而方位角相差约 50°。考虑到光的强弱，跟踪程序可简化设计。

本算法中：①未考虑大气折射影响——蒙气差的存在。由文献[4]可得蒙气差最大时达 0.5°～0.6°，因此应加以修正。②计算太阳位置时未采用力学时而采用了世界时。由于短期内两者之间的差值不影响计算精度，若要确保较长时间内的计算精度，则需要修正。

5　结语

a. 讨论了精确计算太阳位置的方法，基于行星黄道坐标参数理论，采用 J2000 作为新的基准历元。

b. 由计算结果可看出计算误差小，完全能满足太阳能发电的需要，且较适合计算机程序计算，对大型太阳能发电具有重要意义。

参考文献：

[1] 高峰，孙成权，刘全根. 太阳能开发利用的现状及发展趋势[J]. 世界科技研究与发展，2001，23(4)：35-39

[2] 陈维，李戬洪. 太阳能利用中的跟踪控制方式研究[J]. 能源工程，2003(3)：18-21

[3] Blanco-Muriel M，Alarcon-padilla D C，Lopcz-moratalla T，et al. Computing the Solar Vector[J]. Solar Energy，2001，70 (5)：431-441

[4] 王炳忠，汤洁. 几种太阳位置计算方法的比较研究[J]. 太阳能学报，2001，22(4)：413-417

[5] 中国科学院紫金山天文台. 2007 年中国天文年历[M]. 北京：科学出版社，2007.

[6] Meeus J. Astronomical Algorithms，2nd ed[A]. Willmann Bell，Inc. Richmond，Virginia，USA. 1998.

[7] 李铁才，杜坤梅. 电机控制技术[M] . 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2000.

维普资讯 http://www.cqvip.com

High Precision Computation for Sun Position and Its Application in Solar Power Generation

MA Jian XIANG Ping

(Institute of Electromechanical Eng., Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: In the driving-type track system for solar electrical power generation, calculating the solar position to realize the track in order to improve efficiency of the electricity generation is requested. Regarding open-loop control solar energy tracking system, solar position computational accuracy is especially important. This report described the algorithm written in a book by Jean Meeus in 1998 is effective for one thousand years from now., with uncertainties for 0.003°. At last in the paper, we compute solar declination and solar right ascension based on this algorithm and compare the result with the given data. The results show high accuracy, small error and easy programming.

Key words: solar energy; solar right ascension; solar declination; azimuth angle; zenith angle

(上接第 159 页)

[6] Shi Y, Eberhart R. Parameter Selection in Particle Swarm Optimization[A]. Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming [C]. Washington DC, 1998: 591-600

[7] Abid M A, Abdel-Magid Y L. Robust Design of Multimachine Power System Stabilisers Using Tabu Search Algorithm[J]. IEEE Proc-Gener. Transm. Distrib, 2000, 147(6): 387-394

[8] Abido M A. Robust Design of Multimachine Power System Stabilizers Using Simulated Annealing[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15 (3): 297-304

[9] 方卫华. 人工神经网络模型用于水电能源科学的问题探讨[J]. 水电能源科学, 2004, 22(3): 71-73

[10] Omran M G H, Engelbrecht A P, Salman A. Differential Evolution Based Particle Swarm Optimization [A]. Proceedings of the 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium[C]. Hawaii: IEEE computational Intelligence Society, 2007: 112-119

[11] 方强. 基于优进策略的差分进化算法及其化工应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[12] 牛振勇, 杜正春, 方万良. 基于进化策略的多机 PSS 参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22-27

[13] Storn R, Price K. Differential Evolution-A simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 431-459

[14] Yong-Jun Wang, Jiang-She Zhang, Gai-Ying Zhang. A Dynamic Clustering Based Differential Evolution Algorithm for Global Optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183: 56-37

[15] Jani Ronkkonen, Saku Kukkonen, Kenneth V. Price. Real-parameter Optimization with Differential Evolution[A]. The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation[C]. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2005, 1: 506-513

[16] 周保容. 电力系统阻尼控制器参数优化设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

Multi-machine PSS Parameter Optimization Based on Differential Particle Swarm Optimization Algorithm

ZHAO Wenkai FANG Xinyan

(Department of Electrical Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200240, China)

Abstract: A new evolution computation method-Differential Evolution Based Particle Swarm Optimization(DEBPSO) used to optimize the parameters of multi-machine Power System Stabilizers (PSSs), is presented in this paper. By this approach, with an objective function for the minimal damp ratio of all electromechanical modes under conventional system operating condition, the parameter optimization of PSS is referred as a matter of nonlinear, non differential and non convex function optimization over a continuous real-world space. A new differential evolution strategy considering the optimal individual and directional information, based on the conventional differential evolution strategy, is proposed in order to accelerate the convergence of this algorithm. The simulation in 4-machine system indicates that the proposed algorithm has extensive search space, faster convergence speed and better optimization effect in comparison with the conventional optimization algorithm.

Key words: DEBPSO; power system stabilizer; multi-machine power system; parameter optimization