

文章编号 1004-924X(2009)04-0832-07

相关极值的重力匹配辅助导航

夏冰¹, 王浩^{1,2}

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096; 2. 空军航空大学, 吉林 长春 130033)

摘要:对惯性、重力匹配组合导航算法进行了描述和分析,提出了一种新的基于相关极值的重力匹配辅助导航算法。该算法对数字重力图进行细化,运用约束条件在重力图寻值过程中有效地剔除了大量的干扰数据,改进并优化了基于相关极值的传统重力匹配算法。仿真结果表明,该算法将惯导数据误差由 10^{-2} 减小了1~3个数量级,较好地抑制了重力数据误差的影响并提高了匹配精度;将高达 10^{15} 的计算量减少到了 10^7 ,大大提高了重力匹配的速度,达到了实时导航的目的;同时也有效地消除了厄缶(*Eötvoös*)效应对重力匹配的影响,更适合于水下导航的实际需要。

关键词:组合导航;重力匹配;相关极值法;厄缶效应

中图分类号:TP393.6;V249.31 **文献标识码:**A

Gravity matching aided navigation of maximum correlation

XIA Bing¹, WANG Hao^{1,2}(1. *Southeast University, Nanjing 210096, China;**2. Aeronautics University of Air Force, Changchun 130033, China*)

Abstract: A new gravity matching aided navigation algorithm based on maximum correlation theory is put forward after analysing on the algorithm of INS/gravity matching integrated navigation. The new algorithm can subdivide the gravity map and can eliminate large numbers of interferential data in data gravity map searching process. By constraint conditions to improve the traditional gravity matching algorithm based on maximum correlation effectively. The simulation result shows that the new algorithm can lower the magnitudes of inertial navigation errors from 10^{-2} to 10^{-5} and can reduce calculation capacities from 10^{15} to 10^7 , which meets the requirement of a matching error less than 0.01° . These data reported here prove that proposed algorithm is more effective and more adaptive to restrain the errors of the gravity data, and can improve the orientation precision, decrease the influence of *Eötvoös* effect on the gravity matching, and can speed up the gravity matching for navigation in real-time.

Key words: integrated navigation; gravity matching; theory of maximum correlation; *Eötvoös* effect

收稿日期:2008-04-22;修订日期:2008-11-18.

基金项目:国防科技基础预研基金资助项目(No. 623010107);国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 50805110);教育部科学技术研究重点资助项目(No. 109145)

1 引言

随着现代导航、制导技术的不断进步,人们对水下载体的导航技术提出了自主、精确和隐蔽的要求。卫星导航(如 GPS、GLONASS、北斗等)、无线电导航(多普勒)、天文导航和声纳导航等在导航时由于需要与外界信息的交换,很容易受到外界的干扰、隐蔽性较差;而重力辅助导航系统利用的地球重力场重力信息,其信息的测量不受外界信号干扰、不受测区环境的影响、不需要发射和接收其它电磁信号,是真正的无源导航,特别是在军事上有着突出的战略意义和战略用途。

重力场辅助导航最早由美国提出,并于 1983 年成功地在海上进行了水下载体导航实验测试,后来部署在美国海军三叉戟潜艇上。20 世纪 80 年代美国 Lockheed Martin 公司研制出了含有通用重力敏感模块的无源导航系统,它是一种包括重力仪和重力梯度的当地稳定平台,用于实时估计垂线偏差以及补偿 INS 的误差。90 年代初由静电陀螺仪、重力图和深度探测仪等组成的无源重力导航系统开发成功,该系统在 90 年代末搭载在 USUN 先锋号战舰和战略核潜艇上进行试验,结果证明惯性/重力匹配组合导航对位置和速度信息有很大改善,可有效延长惯性系统的重调周期。

重力辅助导航系统由于具有长期、全天候、高度自主、隐蔽性,抗干扰性和高精度性等诸多优点,在航空、航海、陆地导航和地球遥感测绘、自然资源的勘探和发现等军事、民用领域都有着广泛的应用,正越来越受到人们的重视,已逐步成为现代舰船导航领域的研究热点和前沿。

本文通过对惯性/重力组合导航系统和相关极值法的叙述和分析,提出了一种新的基于相关极值的重力匹配辅助导航算法。该算法用网格点的对应关系描述相关极值法,并在此基础上找出了重力匹配过程中应该遵循的匹配约束条件。利用重力匹配约束条件对待匹配点进行选择,剔除了大量的匹配干扰数据,改进了最小二乘算法,消除了厄缶效应对重力导航的影响。试验证明该算法将高达 10^{15} 的计算量减少到了 10^7 ,将惯导数据误差由 10^{-2} 减小了 1—3 个数量级,具有定位精确、验算快速匹配实时的特点,更适合水下导航实

际的需要。

2 重力匹配算法及相关极值理论

在惯性/重力匹配组合导航系统中,重力匹配算法是重力辅助导航模块的核心技术。它是利用重力传感器测得的地球重力场特征和惯导系统的输出值来推算惯导系统的输出误差,进而匹配出载体真实位置的一种导航算法。重力匹配算法的基本原理是:重力特征传感器实测得到重力信息,重力数据库(内含数字重力图)根据惯导信息得到相应位置的重力特征参数,运用重力匹配算法对两种重力特征参数进行比对和匹配,并将匹配结果反馈给惯导系统用以校正惯导的误差,从而得到更为精确的导航数据。重力辅助导航系统包括惯导系统、重力数据库、重力传感器和重力匹配算法模块几个部分,重力匹配算法的原理如图 1。

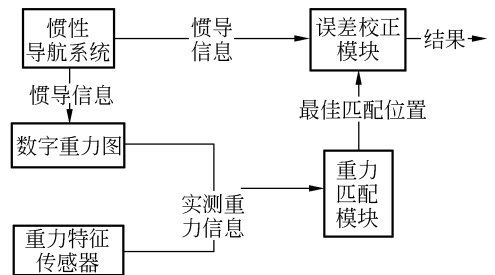


图 1 重力匹配算法原理图

Fig. 1 Theory of gravity matching algorithm

常用的重力匹配算法大致有:相关极值法^[1]、扩展卡尔曼滤波法^[6,8]、ICCP 算法^[9,10]、神经网络及统计模式识别等算法。

由于重力场是随机场,具有不规则性(见图 2),所以常用重力匹配算法的匹配误差较大。同时,常用重力匹配算法是为了达到较高的匹配精度,一般以对应多个等值点的连续惯导输出点为一组进行匹配,所以其运算量巨大,匹配速度较慢,影响导航的实时性。

上世纪 70 年代,苏联学者克拉索夫斯基(A. A. Красовский)等将统计解析理论和导航系统理论相结合,创立了相关极值导航系统理论^[1]。该方法首先在巡航导弹地形匹配中得到了成功应用。由于重力场与地形场都是随机场,故该方法

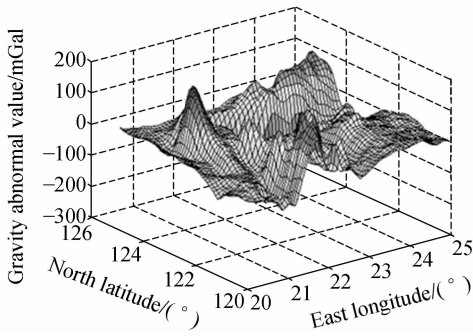


图 2 随机重力场图

Fig. 2 Random gravity field

在重力场也同样适用。

3 基于相关极值的重力匹配辅助导航算法

3.1 数字重力图的细化

重力匹配导航是基于数字重力图的导航,数字重力图的精度很大程度上影响了重力匹配导航的精度。

本文使用的数字重力图是 EGM96,它是美国国防测绘局在上世纪 70 年代利用人造地球卫星技术,采用 NIMA(美国国家影像和测绘局)的 GEOSAT/GM 测高数据计算得到的全球重力场模型。

其全球分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,本文使用双线性插值法对其进行细化。线性插值法的基本原理如图 3。

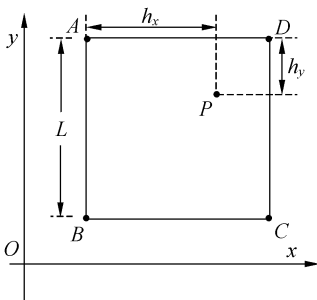


图 3 双线性插值法原理图

Fig. 3 Double linear interpolation

网格中 P 点的重力数据值 g_p 可由公式 g_p

$$= \frac{g_A(L-h_x)(L-h_y) + g_B(L-h_x)h_y + g_C h_x h_y + g_D h_x(L-h_y)}{L^2}$$

计算得出。其中, A 、 B 、 C 、 D 点的重力数据分别为 g_A 、 g_B 、 g_C 、 g_D 。

将原有数字重力图细化 100 等分后,得到了 $0.005^\circ \times 0.005^\circ$ 的细化重力网格,即每格 550 m,其精度基本满足了水下载体的导航需要。

3.2 固定搜索区域、寻值

3.2.1 固定搜索区域

由于惯导漂移的存在,水下潜器的实际位置应该在以惯导输出点为中心,惯导漂移长度为半径的圆形搜索区域内。通过对实测惯导数据的分析,根据瑞利(Rayleigh)分布确定对应于一定时间的惯导漂移范围。

为了便于匹配与仿真,选择 N 个连续惯导输出点(通常 $N \geq 10$)为一组,在数字重力图上找到它们的位置,然后分别以其为中心,以最后一点对应的漂移距离 γ_N 为半长(也是最长的一个),确定一组矩形的搜索区域。

3.2.2 寻找等值点

将对应于惯导输出点 i 的重力传感器输出 $g_i(x_i, y_i)$ 与搜索区域内的每个重力网格点上的重力数据 $g_i(x_k, y_k)$ 进行比较,若 $|g_i(x_i, y_i) - g_i(x_k, y_k)| = \Delta g_i \leq \delta$ (其中 δ 为满足导航精度的接近于 0 的正数),则网格点 k 为惯导输出点 i 的重力等值点。这样,每个搜索区域内都可以找到多个重力等值点。

3.3 剔除干扰数据

3.3.1 匹配约束条件

通过对惯导系统漂移研究发现,较短时间内的漂移很小,可以忽略不计。因此,在较短时间内,两个连续的惯导输出点运动轨迹与对应的实际运动轨迹应该是相仿的。如图 4,假设水下载体匀速直线运动,实际轨迹 ABC 与惯导输出轨迹平行。

因此,匹配约束条件为:在较短时间内惯导输出轨迹与实际轨迹平行,即相邻的惯导输出点 A 、 B 的距离 L 与位移角度 α 分别与实际点相同,即:

$$L(A(x_i, y_i), B(x_i, y_i)) = L(A(x_k, y_k), B(x_k, y_k)), \quad (1)$$

$$\arctan \left| \frac{y_i(A) - y_i(B)}{x_i(A) - x_i(B)} \right| = \arctan \left| \frac{y_i(A) - y_i(B)}{x_i(A) - x_i(B)} \right| = \alpha. \quad (2)$$

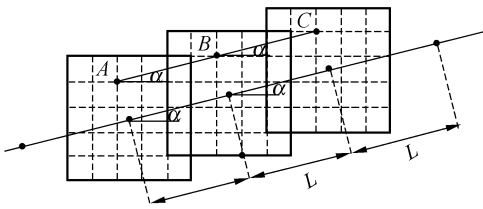


图 4 约束条件示意图

Fig. 4 Constraint condition

3.3.2 正、逆向剔除匹配干扰数据

在重力匹配前,运用匹配约束条件对与一组惯导输出点对应的重力等值点沿运动轨迹正向和逆向分别进行约束,可以剔除大量的匹配干扰数据,如图 5 所示。

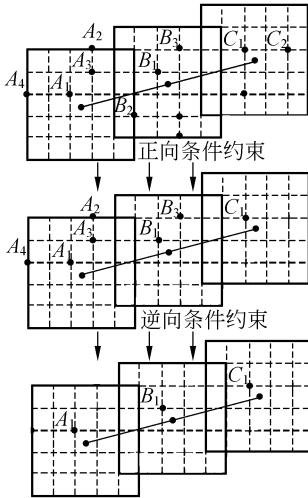


图 5 剔除匹配干扰点

Fig. 5 Eliminating interference data

图中 $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_3, C_1, C_2$ 都是各组重力等值点。运用约束准则,正向约束后剔除了 B_2, C_2 ;逆向约束后剔除了点 A_2, A_3, A_4, B_3 。

匹配约束条件使得固定矩形搜索区域的优势得以充分发挥,在保持匹配精度的同时,大量剔除了匹配干扰点,极大地提高了匹配速度。

3.4 加权最小二乘算法

3.4.1 匹配时加入匹配约束条件

在重力匹配过程中,运用匹配约束条件,同样可以减少计算量,提高匹配速度。例如,对于每个包含 N 个等值点的 i 个搜索区域来说,匹配的运

算量从 $\prod_{i=1}^n N_i$ 次锐减到少于 $\min\{N_i\}$ 次。

3.4.2 加权

由于惯导漂移的不断增大,前一时刻惯导输出数据比后一时刻数据包含更多的有用信息,因此,匹配过程中对前一时刻利用的权重应该大于后一时刻。

3.4.3 加权最小二乘法

在一组搜索区域中,按照匹配约束条件,逐一选取重力等值点连接成多条待选轨迹,然后求待选轨迹中的实测重力值 $g_i(x_t, y_t)$ 与对应的数字重力图值 $g_i(x_k, y_k)$ 差的平方和,并根据权重 μ_i

的大小求得结果,即: $\Delta A = \sum_{i=1}^N \mu_i [g_i(x_t, y_t) - g_i(x_k, y_k)]^2$ 。由于加权最小二乘法的鲁棒性非常好,有利于取得较好的匹配结果并提高导航精度。

3.5 消除厄缶(Eötvös)效应对重力数据的影响

在重力数据的实际计算中,不能忽视厄缶效应的影响。由于厄缶效应 $E_i = 2\Omega B_{Ei} \cos \varphi_i + \frac{V_{Ei}^2 + V_{Ni}^2}{R}$,其中 V_{Ei} 和 V_{Ni} 为 i 时刻的东向和北向速度; φ_i 为纬度值,其数量级是 10^{-6} ,它的变化能对重力差值 Δg_i 的最终结果产生影响。因此,重力值 g_i 应该等于标准重力值 g_{si} 与重力异常值 g_{ai} 的和减去厄缶效应 E_i ,即 $g_i = g_{si} + g_{ai} - E_i$ 。

为了进一步提高算法的精度,应该最大限度地消除厄缶效应对重力数据的影响。本文使用连续两个时刻的 Δg 相减,即 $\sum_{i=1}^N \mu_i [g_{i+1}(x_t, y_t) - g_i(x_t, y_t) - g_{i+1}(x_k + y_k) + g_i(x_k, y_k)]^2$ 来代替原算式,能够较好地消除厄缶效应对重力数据的影响。

3.6 匹配结果的优化选择

经过对大量的相关极值重力匹配算法的匹配结果研究发现:由于地球重力场的无规律性,加权最小二乘算法得到的最小匹配结果有时并不是最好的。据匹配仿真数据统计,96.3%最佳的匹配结果都存在于加权最小二乘最小的 5 组结果中,如图 6 所示。

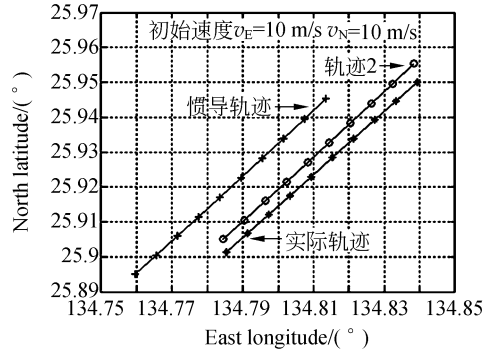
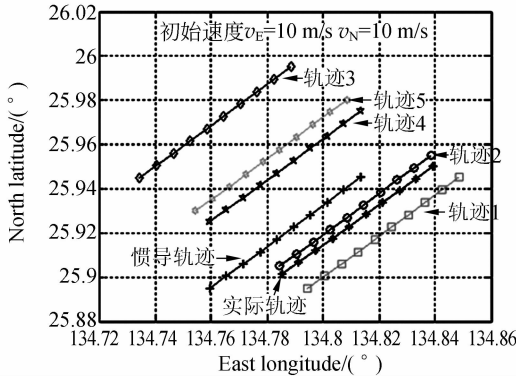


图 6 加权最小二乘结果中最小的 5 组匹配结果

Fig. 6 Least five groups matching results of weight least square algorithm

图 7 优化选择的匹配结果

Fig. 7 Gravity matching results of optimized selection

因为在较短的时间内,惯导系统漂移不大,真实点位置往往就在惯导输出点附近,图 6 的结果也验证了这一点。所以,在加权最小二乘结果最小的 5 组轨迹中选择距离惯导输出轨迹距离最近的一组作为匹配结果。

即求 $\min \left\{ \sum_{i=1}^N \| T(x_i, y_i) - S(x_i, y_i) \| \right\}$, 其中, $T(x_i, y_i)$ 为待选择轨迹上 i 点坐标, $S(x_i, y_i)$ 为惯导输出轨迹上 i 点坐标。

4 实验

本文运用 Visual C++ 6.0 开发了水下重力场辅助导航系统仿真软件。软件主要由载体运动模块、惯导系统输出模块、数字重力图细化模块和改进后的相关极值重力匹配算法模块组成。仿真选择的区域是东经 125~135°, 北纬 25~35°, 重力异常分辨率为 0.5°×0.5° 的范围内。假定水下潜器以 $v_{E0} = 10$ 、 $v_{N0} = 10$ 为初始速度, 任意选择起始点进行重力匹配运算, 仿真结果及比较如表 1 所示(匹配误差要求 $< 0.01^\circ$)。

表 1 惯导坐标、匹配结果、误差分析、计算量比较

Tab. 1 Comparison of coordinates of INS, matching results, error analysis and computation capacities

组数	项目	惯导(°)	匹配(°)	漂移 误差	匹配结	未约束	约束后
				(°)	果误差(°)	计算量(次)	计算量(次)
1	Lat=	32.066 0 (N)	32.056 0 (N)	0.013 2	0.003 2	$5.784 8 \times 10^{15}$	$1.786 2 \times 10^6$
	Lon=	127.809 7 (E)	127.844 7 (E)	0.033 4	0.001 6		
2	Lat=	26.189 6 (N)	26.154 6 (N)	0.034 9	0.000 1	$6.100 7 \times 10^{15}$	$1.188 6 \times 10^7$
	Lon=	132.857 1 (E)	132.842 1 (E)	0.022 6	0.007 6		
3	Lat=	29.866 0 (N)	29.846 0 (N)	0.023 7	0.003 7	$3.546 3 \times 10^{15}$	$1.155 6 \times 10^6$
	Lon=	126.589 7 (E)	126.579 7 (E)	0.014 2	0.004 2		
4	Lat=	33.405 2 (N)	33.410 2 (N)	0.004 8	0.000 2	$1.386 8 \times 10^{15}$	$2.558 5 \times 10^6$
	Lon=	133.828 0 (E)	133.843 (E)	0.015 8	0.000 8		
5	Lat=	28.705 0 (N)	28.725 0 (N)	0.019 3	0.000 7	$5.836 9 \times 10^{15}$	$1.265 9 \times 10^7$
	Lon=	134.384 6 (E)	134.404 6 (E)	0.026 8	0.006 8		

从表中可以看出,基于相关极值的重力匹配辅助导航算法将惯导数据误差由 10^{-2} 提高了 1~

3 个数量级,较好地满足了误差 $< 0.01^\circ$ 的匹配要求,显著提高了导航的精度。同时,算法通过运用

匹配约束条件,将高达 10^{15} 的计算量减少到了 $10^6 \sim 10^7$,有效地提高了算法的匹配和运算速度,保证了匹配运算的实时性和高效性。

5 结 论

基于相关极值的重力匹配辅助导航算法,通过对 EGM96 数字重力图的细化,利用惯导漂移规律确定重力搜索区域,并灵活应用匹配约束条件对重力等值点进行正向、逆向搜索和重力匹配,

有效剔除了大量的重力干扰数据和干扰轨迹;改进并优化了传统的重力匹配算法,消除了厄缶效应对重力数据的影响,较好地提高了导航精度。仿真结果表明,该算法不仅能大大提高重力匹配的运算速度,满足快速匹配、实时导航的要求,而且也能够较好地抑制惯导系统的漂移误差,显著提高惯导系统的导航精度,更好地满足水下导航的实际需要。基于相关极值的重力匹配辅助导航算法为解决水下潜器导航提供了一条新的技术途径。

参考文献:

- [1] A. A. 克拉索夫斯基(苏),任思聪译. 相关极值导航系统理论[M]. 北京:航空工业出版社,1986.
KRASOVSKI A A. *REN S C translation. Theory of Maximum Correlation Navigation System* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1986. (in Chinese)
- [2] MARK DUCHAINEAU, MURRAY WOLINSKY, et al.. ROAMing Terrain: Real time Optimally Adapting Meshes [C]. In: *Proc. IEEE Visualization Phoenix*, AZ, USA, 1997:81-88.
- [3] 孙枫,袁贛南,张晓红. 组合导航系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1996.
SUN F, YUAN G N, ZHANG X H. *Integrated navigation system* [M]. Harbin: Harbin Industrial University Press, 1996. (in Chinese)
- [4] FRYXELL D, OLIVEIRA P, PASCOAL A, et al.. Integrated design of navigation, guidance and control systems for unmanned underwater vehicles [C]. *Proceedings OCEAN'94 III*, 1994:105-110.
- [5] BEHZAD KAMGAR P, BEHROOZ KAMGAR P. Vehicle localization on gravity maps [J]. *SPIE*, 1999, 3639:182-191.
- [6] 李雄伟,刘建业,康国华. TERCOM 地形高程辅助导航系统发展及应用研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, 14(01):34-40.
LI X W, LIU J Y, KANG G H. Development and application of TERCOM elevation-aided navigation system[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(01):34-40. (in Chinese)
- [7] 黄谟涛,翟国君,欧阳永忠,等. 海洋重力测量误差补偿两步处理法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2002, 27(3):227-228.
HUANG M T, ZHAI G J, OUYANG Y ZH, et al.. Two-Step Processing for Compensating the Systematic Errors in Marine Gravity Measurements [J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(03):227-228. (in Chinese)
- [8] 袁书明,孙枫,刘光军,等. 图形匹配技术在水下导航中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2004, 12(2):13-17.
YUAN SH M, SUN F, LIU G J, et al.. Application of gravity map matching technology in underwater navigation [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2004, 12(02):13-17. (in Chinese)
- [9] 魏东. 重力匹配定位方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
WEI D. *A study of method of gravity matching orientation* [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2003. (in Chinese)
- [10] 吴剑明. 水下潜器组合导航定位研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.
WU J M. *A study of underwater integrated navigation and orientation* [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2004. (in Chinese)
- [11] 孙中苗. 航空重力测量中厄特弗斯改正的计算与误差分析[J]. *测绘学院学报*, 1999, 16(1):5-9.
SUN ZH M. Calculation and Error Analysis of Eotvos Corrections for Airborne Gravimetry [J].

Journal of the PLA institute of surveying and mapping, 1999, 16(1): 5-9. (in Chinese)

- [12] 白焱, 王伟, 吴成富, 等. 基于高程熵的综合匹配算法在地形匹配上的应用[J]. 测控技术, 2004, 23(3): 1-2.

BAI Y, WANG W, WU CH F, *et al.*. Application of Altitude-Entropy Based Synthetical Terrain-Matching Methodology in Terrain-Matching [J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(3): 1-2. (in Chinese)

作者简介:



夏冰(1980—), 男, 东南大学博士研究生, 主要从事惯性导航、重力导航的研究。E-mail: kingoldfive@tom.com



王浩(1978—), 男, 空军航空大学讲师, 东南大学硕士研究生, 主要从事惯性导航、组合导航的研究。E-mail: wanghao1836@126.com

● 下期预告

大型光电设备基准平面自动调平系统

姜伟伟^{1,2}, 高云国¹, 冯栋彦^{1,2}, 陈兆兵^{1,2}, 蒲继承³

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

介绍了一种光电设备自动调平系统的研制方法。选用三条机械支腿支撑大型光电设备载车, 由安装在光电设备基座上的倾角传感器测得基准平面的倾角大小及方向, 将此角度根据调平算法换算为三个机械支腿的伸长量, 驱动机械支腿伸长使基准平面达到水平。给出了支撑腿数量、机械式支腿的选择依据, 设计了一种可以在小角度范围内可以自动矫正受力方向的机械支腿, 设计了整个传动系统, 并且给出了驱动电路, 还给出了调平算法。经实验测定调平精度为 0.003° , 整个光电设备调平时间约为 120 s。实验结果表明: 较以往的调平系统该系统缩短了光电设备开展工作的准备时间、提高了调平精度。