

文章编号:1002-2082(2012)02-0321-06

一种高精度测量坦克炮塔动态转角的方法

权贵秦¹,冯伟强¹,张建峰²,于 询¹

(1. 西安工业大学 光电工程学院,陕西 西安 710032;2. 西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘 要:坦克炮塔相对底盘转角的测量精度直接决定了稳瞄系统与惯导系统的精度。目前,国内的主战坦克所配备的坦克炮塔,其相对底盘的转角测量装置的测量精度低,仅解决坦克车体的转向问题。针对稳瞄系统与惯导系统对坦克炮塔相对底盘转角的精度要求问题,提出了一种由光电定位系统、机械传动系统和旋转变压器组成的动态高精度测角装置,介绍了其工作原理和工作过程,对该测角装置进行光电自准直标定并对误差进行理论分析,最后通过上车实验证明该测角系统能够满足实际需求。实践证明:该测量系统能够在通电瞬间确认位置,具有绝对零位记忆功能,其测角精度为 $42''$ 。

关键词:旋转变压器;光电定位系统;传动比;光电编码

中图分类号: TN202; TP391.4

文献标志码: A

doi:10.5768/JAO201233.0203001

High precision angle measurement method of dynamic tank turret

QUAN Gui-Qin¹, FENG Wei-Qiang¹, ZHANG Jian-feng², YU Xun¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Tank turret rotation angle measurement accuracy relative to the chassis directly determines the precision of the stable sighting system and the inertial navigation system. At present, the main battle tank equipped with a tank turret in the angle measurement device which has low measurement accuracy relative to the chassis can solve the problem of steering the tank body only. This paper proposed a high-precision angle measurement device which was composed of location and orientation system, mechanical drive system and resolver. It firstly introduced the working principle and work process, followed by the angle measuring device calibration and the theoretical analysis of error, the final joint commissioning proved this angle measuring system met the actual demand. Results indicate that this measurement system can confirm the location when instantaneously powered and has absolutely zero memory function, the angular accuracy is $42''$.

Key words: resolver; location and orientation system; drive ratio; optical-electrical encoder

引言

动态角度测量^[1]的精度直接影响陆用车载武器、航空等领域中的跟踪、定位、打击、制导的准确性。目前,国内所有主战坦克中所配备的炮塔相对底盘的转角测量装置只能粗略测量火炮相对底

盘的转动角度,其采用机械表盘显示,不具备信号输出功能;坦克底盘上所配备的角度测量装置仅是解决坦克车体的转向问题,上述测角装置的测量精度低。国内主战坦克上所配备的高精度陀螺,仅实现坦克炮线与瞄线的角度测量,不能够实

收稿日期:2011-10-31; 修回日期:2011-12-05

作者简介:权贵秦(1958—),男,陕西扶风人,教授,主要从事光电仪器设计和光学检测技术研究工作。

E-mail: quanguiqin@sina.com.

现炮塔相对底盘的转角测量。因此,坦克炮塔相对底盘动态转角高精度测量是稳瞄系统与惯导系统在坦克上应用亟需解决的瓶颈技术。

坦克炮塔体积庞大、内部空间复杂狭小,并且测量装置工作在严酷的冲击振动与尘土油污等恶劣环境中,使坦克炮塔与底盘存在严重的径向随机窜动,导致精确测角非常困难。针对如此复杂的坦克结构和恶劣的环境条件,传统的测量转角的技术方法^[2](如圆磁栅测角法、同步感应器测角法、圆光栅测角法、CCD 扫描法、多齿分度盘法和滚压轮法等)均不能满足坦克炮塔与底盘的动态转角测量的完整性、准确性、稳定性、可靠性、客观性等技术要求。目前国内尚无一种方法能够实现坦克炮塔相对底盘高精度的动态转角测量,并且能够实现零位记忆与断电保护等功能。

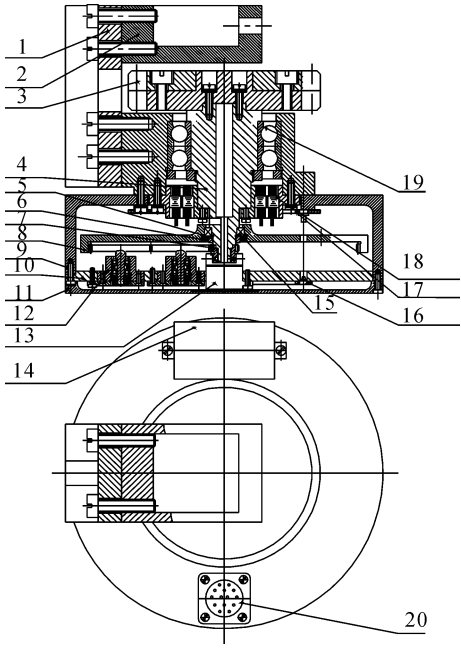
本文提出一种由旋转变压器和光电定位系统^[3-4]组成的测角系统,能够适应恶劣的坦克工作环境,满足高精度动态测角的要求,同时提供绝对零位记忆功能、上电瞬间位置确认功能和定位定向功能,为坦克的精确打击和稳瞄系统与惯导系统提供可靠的技术保障。

1 旋转变压器测角系统结构及工作原理

1.1 测角系统组成结构

旋转变压器测角系统的具体组成结构如图 1 所示,由机械传动系统、旋转变压器测角部分和光电定位系统组成。

机械传动系统由双页消间隙齿轮、转轴、轴承、轴端齿轮和传动齿轮组组成,其中双页消间隙齿轮与坦克炮塔座圈内齿轮啮合,通过转轴、轴承和轴端齿轮将炮塔的转动量传给旋转变压器测角系统和光电定位系统;旋转变压器测角部分由旋转变压器和数字变压器组成,其中旋转变压器的转子与转轴相连,能够输出与转子转角呈某种函数关系的电压信号^[4],数字变换器将旋转变压器输出的模拟量解算成数字量并通过数据接口输出给角度显示单元显示;光电定位系统由接收器组件、发射器组件^[1]、遮挡盘内齿轮、信号处理组件、齿轮安装盘和保护外罩组成,其中遮挡盘内齿轮与传动齿轮组的外齿轮啮合,能够与坦克炮塔同步转动,从而完成光电定位与定向。



1—连接板;2—过渡板;3—双页消间隙齿轮;4—转轴;5—开槽压圈;6—轴承外压圈;7—轴端齿轮;8—遮挡内齿轮;9—固定盘;10—齿轮安装盘;11—底盖板;12—传动齿轮组;13—汇流环;14—信号处理组件;15—轴承;16—发射器组件;17—接收器组件;18—旋转变压器;19—轴承;20—数据接口

图 1 旋转变压器测角系统组成结构图

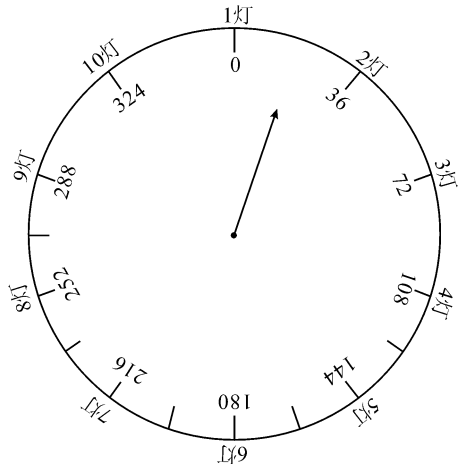
Fig. 1 Resolver angle measurement system structure

1.2 旋转变压器测角系统工作原理

旋转变压器测角系统的测角原理与表盘计时原理相同(如图 2 所示),其中 10 组灯表示光电定位系统测角结果,指针表示旋转变压器测角结果,测角系统的测量结果为

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \tag{1}$$

式中: θ_1 为光电定位系统的粗定位部分; θ_2 为旋转变压器的精确测量部分。



当坦克炮塔转动时,机械传动系统将坦克炮塔相对底盘的转动角传给旋转变压器测角部分和光电定位系统(如图3所示)。光电定位系统能够完成 θ_1 在 36° 范围的粗定位,旋转变压器在该 36° 的定位范围内进行精确测量,并输出测量角度值 θ_2 ,测量结果通过单片机(MCU)数据处理组件综合处理后由角度显示单元显示。

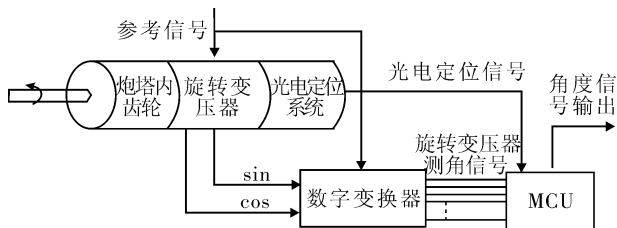


图3 旋转变压器测角系统工作原理图

Fig. 3 Operating principle of resolver angle measurement system

传动系统中的双页消间隙齿轮(如图3所示)与坦克炮塔座圈内齿轮的传动比为 $10:1$,则旋转变压器转一圈为炮塔座圈的 36° ;机械传动系统的轴端齿轮与遮挡盘内齿轮的传动比为 $10:1$,则光电定位系统与坦克炮塔座圈的传动比为 $1:1$ 。由于光电定位系统的接收盘被10组光敏三极管均分,则旋转变压器转一圈为光电定位系统两组光敏三极管之间的角度即 36° ,因此,光电定位系统的定位结果为

$$\theta_1 = (N-1) \times 36^\circ \quad (2)$$

式中 N 表示被点亮的两组光敏三极管的大序号。

旋转变压器在光电定位系统的定位范围内输出角度的精确测量值 θ_2 ,通过(1)式即可计算出旋转变压器测角系统的最终结果。

2 测角系统的标定

本测角系统采用光电自准直标定方法进行标定。光电自准直标定系统^[5]由旋转变压器测角系统、炮塔转角标定台、四组自准直仪、平面反射镜和标准四棱镜组成,标定过程分为炮塔转角标定台的标定(如图4所示)和旋转变压器测角系统的标定(如图5所示)。标定过程采用高精度双通道

正余弦旋转变压器和可编程18位双速旋转变压器数字转换器,其测角精度为 $5''$,采用5W-F550型自准直仪,其精度为 $1''$ 。

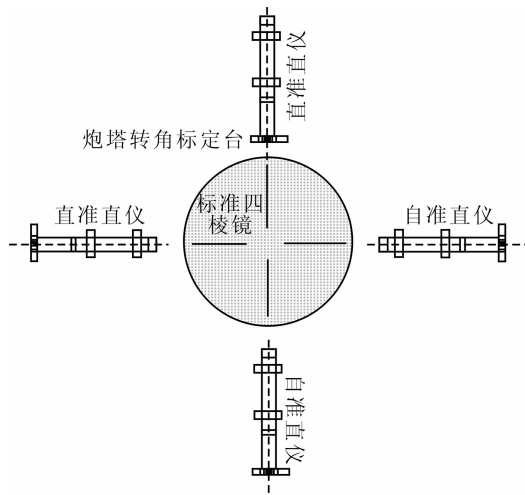


图4 炮塔转角标定台标定示意图

Fig. 4 Calibration schematic of turret angle calibration table

在炮塔转角标定台的标定中,首先将标准四棱镜通过支架固定在与炮塔座圈平行的平面上,用 $1''$ 自准直仪瞄准平面反射镜,调节4组自准直仪使返回的十字像与原像重合,即完成炮塔转角标定台的标定。

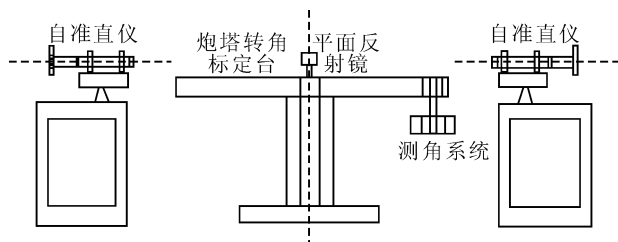


图5 旋转变压器测角系统的标定示意图

Fig. 5 Resolver angle measurement system calibration diagram

在旋转变压器测角系统的标定中,首先将平面反射镜通过支架固定在与炮塔座圈平行的平面上,用其中1组自准直仪瞄准平面反射镜,编码器置零,此点作为测量起始点,使旋转变压器转动4个标准面的角度,其测量过程和测量数据如表1所示。

表 1 光电自准直标定装置测量数据

Table 1 Photoelectric autocollimator calibration device measurement data

转动 方式/(°)	标称值 /(°)	旋转变压器测量值			平均值	标准 偏差/(″)	组内标准 偏差/(″)	组间标准 偏差/(″)
		第 1 次	第 2 次	第 3 次				
0~90	90	90°0′27″	90°0′25″	90°0′28″	90°0′26.7″	3.5	1.5	4.6
90~180	90	90°0′25″	90°0′29″	90°0′24″	90°0′26″	3.2		
180~270	90	90°0′26″	90°0′24″	90°0′28″	90°0′26″	2		
270~360	90	90°0′27″	90°0′25″	90°0′25″	90°0′25.7″	3.1		
0~180	180	180°0′24″	180°0′23″	180°0′28″	90°0′25″	1	0.7	
180~360	180	180°0′28″	180°0′24″	180°0′26″	90°0′26″	1		
0~360	360	360°0′27″	360°0′22″	360°0′26″	90°0′25″	3.5	3.5	
0~-360	360	360°0′22″	360°0′26″	360°0′26″	90°0′25″	1.5	1.5	
0~-180	180	180°0′28″	180°0′25″	180°0′22″	90°0′25″	1	1.1	
-180~-360	180	180°0′28″	180°0′27″	180°0′23″	90°0′26″	2		
0~-90	90	90°0′28″	90°0′28″	90°0′24″	90°0′26.7″	4.2	1.6	
-90~-180	90	90°0′26″	90°0′28″	90°0′24″	90°0′26″	2.3		
-180~-270	90	90°0′27″	90°0′24″	90°0′27″	90°0′26″	1.7		
-270~-360	90	90°0′24″	90°0′25″	90°0′28″	90°0′25.7″	3.7		

3 测角系统误差分析

测角系统的误差主要包括旋转变压器的测角误差、机械传动系统的误差和光电定位系统的误差。

3.1 旋转变压器的测角误差

旋转变压器的误差主要包括测量元件误差和变换电路误差。

本文采用高精度双通道旋转变压器和双速 18 位 RDCHTS20 数字转换器(其粗机采用 14 位 RDC 解算)^[6],采用 1:64 对极的精机,平均峰一峰误差 δ_1 为 5″;变换电路的误差主要由 3 部分组成,分别为变换芯片的误差 δ_2 、相移误差 δ_3 及幅值误差 δ_4 。

根据参考文献[7],相移误差模型为

$$\delta_e = (0.53a \times b)' \tag{3}$$

式中: a 为 sin 输入和 cos 输入信号的相移,单位为度; b 为信号和参考信号的相移,单位为度。

幅值误差模型为

$$\delta_p = a/2\sin(2\alpha_D) \tag{4}$$

式中 a 为 sin 输入和 cos 输入的幅值相对波动。

可编程 18 位双速旋转变压器数字转换器 RDCHTS20 精度 $\delta_2 = 360^\circ/2^{18} = 4.9''$,利用移相器将参考信号和信号的相移控制在 10^0 以内,两路信号的相移控制在 4^0 以内,根据(4)式得误差 $\delta_3 =$

3.53″;幅值误差最大为 $\delta_4 = a/2$,实际值很小,可以忽略。各项误差不相关,则有:

$$\delta_{\text{旋变}} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = 7.9'' \approx 0.037 \text{ mrad}$$

3.2 齿轮传动系统的误差

齿轮传动系统的误差主要有转角误差。本测角系统的齿轮精度为 7-fGB10095-88,根据参考文献[9],转角误差主要有齿轮本身误差和齿轮与轴的联接所产生的偏心和轴承误差。

齿轮本身误差为

$$\varphi_1 = 2F_i'/d \tag{5}$$

式中: F_i' 为切向综合误差的公差; d 为分度圆的直径。

齿轮与轴的联接所产生的偏心

$$\varphi_2 = -4e/d\cos\alpha \tag{6}$$

式中: e 为偏心量; α 为压力角。

轴承误差为

$$\varphi_3 = 2E_D/d\cos\alpha \tag{7}$$

式中: E_D 为转动座圈的径向偏摆; α 为压力角。

根据(5)式、(6)式、(7)式和齿轮的精度要求,可以得到齿轮的转角误差 $\delta_4 = \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2} = 0.1 \text{ mrad}$ 。

3.3 光电定位误差

定位误差主要包括光电定位系统中光敏管的安装误差。

光电定位系统中光敏管的安装误差主要是接收板 PCB 板过孔的尺寸误差:

$$\delta_5=(a/b)=(0.002\ 54/45)\times1\ 000=0.056\ \text{mrad}$$

式中: a 为过孔与接收管脚配合间隙,单位为 mm;
 b 为 PCB 板的半径,单位为 mm。

综上所述,旋转变压器测量组件总误差 δ 为

$$\delta=\sqrt{\delta_{\text{旋变}}^2+\delta_4^2+\delta_5^2}\approx0.12\ \text{mrad}=25.9''。$$

4 测角系统实测实验及数据处理

旋转变压器测角系统的上车试验如图 6 所示,其中经纬仪放置在坦克炮塔的旋转中心处。

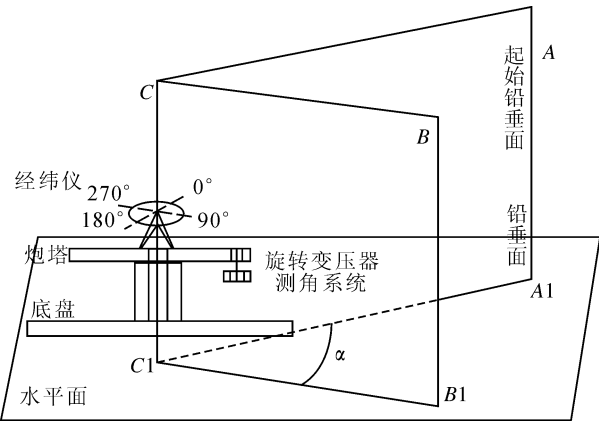


图 6 测角系统的上车试验示意图

Fig. 6 Field test diagram of angle measuring system

测量时,经纬仪瞄准铅垂线 AA1 作为初始零位,随机转动 α 角度后读取旋转变压器的值和经纬仪的值,然后旋转经纬仪使其再次瞄准铅垂线 AA1 并读取此时经纬仪的值,经纬仪两次的差值即为坦克炮塔相对底盘转动的标准角。重复上述步骤,测量数据如表 2 所示。

表 2 上车实测数据

Table 2 Field measurement data

测量次数	旋转变压器 测量角度	经纬仪 测量角度	误差/($''$)
1	8°0'18"	7°59'40"	38
2	18°0'18"	18°1'1"	-43
3	42°0'18"	42°59'32"	46
4	83°0'18"	83°0'58"	-40
5	146°0'18"	146°0'55"	-37
6	159°2'10"	159°0'18"	118
7	241°0'18"	240°59'34"	44
8	247°0'18"	246°58'15"	123

续表

测量次数	旋转变压器 测量角度	经纬仪 测量角度	误差/($''$)
9	287°2'05"	287°0'18"	107
10	308°0'18"	308°1'0"	-42
误差 $\delta=\sqrt{\frac{\sum(\text{误差值})^2}{n}}$			41.5

在实际测量时,测量结果中存在大误差数据,剔除粗大误差后得测角精度为 41.5 $''$,考虑到坦克复杂的机械结构,该测角系统能够满足实际测量的需求。

5 结论

本文介绍了一种坦克炮塔与车体底盘相对转动角的动态高精度测量方法,该方法采用双通道旋转变压器完成转角的高精确动态测量,结合光电定位系统,在 0~360°的测量范围,能够实现通电瞬间位置确认功能和绝对零位记忆功能。通过光电自准直标定,该旋转变压器测角系统的测角精度可以达到 25.6 $''$ 。实践证明,该测角系统精度达 42 $''$ 。该系统能为坦克的精确打击提供可靠的技术保障,具有很高的使用价值。

参考文献:

[1] 金洵,毛亮,吴旭贤. 激光陀螺动态测角仪瞄准指示装置的研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1064-1067.
JIN Xun, MAO Liang, WU Xu-xian. Research on collimation indicator in dynamic angular measurements with a RLG[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(10): 1064-1067. (in Chinese with an English abstract)

[2] 徐建华. 低成本高精度角位移测量系统研究与设计[D]. 太原: 中北大学, 2008.
XU jian-hua. Research and design of Low-cost and high-accuracy angular displacement measuring system [D]. Taiyuan: North university of China, 2008. (in Chinese)

[3] 朱银生, 赵创社, 史志富, 等. 机载光电稳瞄系统实时被动测距方法研究[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 888-891.
ZHU Yin-sheng, ZHAO Chuang-she, SHI Zhi-fu.

- Real-time passive ranging for airborne electro-optical stabilized sight system[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 888-891. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 高明,刘缠牢. 光电仪器设计[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005.
- GAO Ming, LIU Chang-lao. Optical instrument design [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)
- [5] 程明. 微特电机及系统[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- CHENG Ming, Micro-motor and system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 叶辉. 高平稳低速率转台测角系统的设计和研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- YE Hui. Research on high smooth and low speed turn-table angular measurement system[D] Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] 程钧,李信之. 高精度轴角编码器的多极旋变选用及结构精度设计[J]. 电子机械工程, 2001, 93(5): 8-10.
- CHENG jun, LI Xing-zhi. The selection of the multi-pole rotary transformer and the structure precision design of the high resolution shaft position coder[J]. Electronic and Mechanical Engineering, 2001, 93(5): 8-10. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 石治国,衣同胜,齐凤梅. 圆感应同步器数显表检测方法研究[J]. 光学技术, 2006, 32: 383-385.
- SHI Zhi-guo, YI Tong-sheng, QI Feng-mei. Research of the digital read out instrument testing ways based on the round inductosyn[J]. Optical technique, 2006, 32: 383-385. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 庞振基,黄其圣. 精密机械设计[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- PANG Zhen-ji, HUANG Qi-sheng. precision mechanical design [M]. Beijing: China machine press, 2000. (in Chinese)
- [10] 石柱,何伟,覃文治,等. 中心带雪崩光电二极管的InGaAs PIN四象限探测器[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 824-828.
- SHI Zhu, HE Wei, TAN Wen-zhi, et al. Quadrant PIN photo-detector integrated APD in the center on the basis of InGaAs heterostructure [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 824-828. (in Chinese with an English abstract)