

塔式光热电站定日镜跟踪精度校正技术研究

吴凯¹, 马敬², 程斌², 王长久²

(1. 陕西君创智盈能源科技有限公司, 陕西 西安 710016;

2. 中国能源建设集团西北电力试验研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:为提高光热电站定日镜校正合格率,从定日镜跟踪精度校正的必要性出发,结合塔式光热电站定日镜控制系统及光斑校正系统对校正的理论依据、校正策略等进行了研究,分析了风速、云层及太阳直接辐射(DNI)、镜面清洁系数、校正系统及临时局域网的稳定性等因素对校正结果的影响,并提出了具体的应对策略。研究表明,当风速小于5 m/s、DNI值大于800 W/m²、镜面清洁系数超过0.7时定日镜跟踪精度的校正合格率能够达到60%以上。

关键词:塔式光热电站;定日镜;跟踪精度;校正

中图分类号:TK519

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.05.019

[引用本文格式]吴凯,马敬,程斌,等.塔式光热电站定日镜跟踪精度校正技术研究[J].热能动力工程,2022,37(5):137-142. WU Kai, MA Jing, CHENG Bin, et al. Research on tracking accuracy correction technology of heliostat in tower solar thermal power station[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5):137-142.

Research on Tracking Accuracy Correction Technology of Heliostat in Tower Solar Thermal Power Station

WU Kai¹, MA Jing², CHENG Bin², WANG Chang-jiu²

(1. Shaanxi Jun Chuang Zhi Ying Energy Technology Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code:710016; 2. Northwest China Electric Power Test Research Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Corporation Limited, Xi'an, China, Post Code:710000)

Abstract: In order to improve the qualification rate of heliostat correction in tower solar thermal power station, starting from the necessity of heliostat tracking accuracy correction, combined with heliostat control system and spot correction system of tower solar thermal power station, this paper studied the theoretical basis and correction strategy of correction, analyzed the influence of wind speed, cloud and solar direct radiation (DNI), mirror cleanliness coefficient, the stability of correction system and temporary LAN on the correction results, and put forward specific countermeasures. The research results show that when the wind speed is less than 5 m/s, the DNI value is more than 800 W/m², and the mirror cleaning coefficient is more than 0.7, the calibration pass rate of heliostat tracking accuracy can reach more than 60%.

Key words: tower solar thermal power station, heliostat, tracking accuracy, correction

引言

光热发电技术是太阳能发电的一种重要发电形

式,在光热电站的生命周期内(一般为25年)每度电的碳排放仅为光伏发电的1/6,具有巨大的市场应用前景。

定日镜是塔式光热电站聚光集热系统中一个重

要设备,其作用是完成太阳能的捕获,并将捕获的太阳能反射至吸热器,在吸热器中完成太阳能与熔盐的能量传递。定日镜跟踪精度在保证吸热器的均匀受热及运行效率方面有重要作用。为了保证定日镜的跟踪精度,研究者在定日镜跟踪控制系统^[1-2]、数学计算模型^[3-4]、跟踪精度校正误差控制^[5-8]和定日镜机械传动结构^[9-11]等方面开展了大量的研究,并进行了相关的实践^[12-13]。

本文以某塔式光热电站工程定日镜跟踪精度校正为背景,对定日镜跟踪精度校正的理论依据、基本策略、影响因素及其应对措施等进行了研究。研究内容在提高定日镜校正效率、缩短定日镜场调试周期等方面具有一定的借鉴意义。

1 定日镜结构

单个定日镜的镜面面积与镜场布置、镜面形状、镜场阴影遮挡等因素有关^[14]。目前,国内外典型的光热电站单个定日镜的镜面面积有 1.14, 2.8, 15 (小定日镜), 48.5 (中定日镜), 96, 115.7, 140 和 178.5 m² (大定日镜)^[15]。本文研究的光热电站采用目前世界上唯一的正五边形(巨蜥式)定日镜,其镜面面积为 48.5 m²,具有土地利用程度高、电量消耗低、智能化控制程度高和面型误差精度高等优点。在受到定日镜自重和风载荷的共同作用下其镜面变形小而均匀。巨蜥式定日镜的形状是综合考虑了镜场阴影和遮挡效率后作出的最优设计,该定日镜的理论反射率高达 93% 以上,如图 1 所示。



图 1 巨蜥式定日镜

Fig. 1 Goanna heliostat

2 塔式光热电站定日镜跟踪精度校正

2.1 校正的必要性

在塔式光热电站定日镜场的布置设计中,每面定日镜的坐标数据都是通过理论模型计算确定的,每一时刻太阳光斑入射至定日镜镜面后反射至光斑校正靶面的位置坐标也是固定的。由于定日镜安装精度、立柱数据测量误差、立柱地基沉降和坐标位置误差等方面因素的影响,造成每一时刻定日镜反射光斑的实际坐标偏离理论坐标,产生偏差,使得定日镜的跟踪精度变差。使用跟踪精度较差的定日镜有可能造成吸热器受热不均、损坏和效率低等问题,因此需要定期进行定日镜跟踪精度校正工作。

2.2 理论依据

定日镜跟踪精度校正坐标系如图 2 所示。以吸热塔底部圆心为坐标原点,正东方向为 x 轴,正北方向为 y 轴,吸热塔中轴线塔高方向为 z 轴。由于定日镜镜面在生产过程中的精度控制要求很高,通常认为定日镜镜面为一理想平面。假设某定日镜的理论中心坐标为 (x_1, y_1, z_1) ,某一时刻太阳入射光线射入该定日镜中心坐标后,反射至光斑校正靶面的理论位置应为 (x_0, y_0, z_0) 。但是由于实际情况中该定日镜的实际中心坐标偏差至 (x'_1, y'_1, z'_1) ,从而使得实际光斑位置偏至 (x'_0, y'_0, z'_0) 。实际光斑位置与理论位置产生偏差,通过不断地修正 (x'_0, y'_0, z'_0) 与 (x_0, y_0, z_0) 之间的偏差,当该偏差值低于 3.5 mrad(中国国家太阳能光热技术创新联盟标准)时,认为该定日镜的跟踪精度合格。

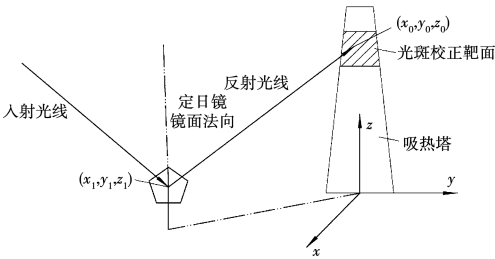


图 2 定日镜校正坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heliostat calibration coordinate system

对理论模型进行修正计算时,需要计算某一时刻的太阳高度角 H_s 和太阳方位角 A_s ,计算式为:

$$H_s = \arcsin(\sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\theta) \quad (1)$$

$$A_s = \arccos\left(\frac{\sin H_s \sin\phi - \sin\delta}{\cos H_s \cos\phi}\right) \quad (2)$$

式中: H_s —太阳高度角, (°); A_s —太阳方位角, (°); ϕ —观测地点的地理纬度, (°); δ —太阳赤纬角, (°); θ —观测时刻的太阳时角, (°)。

需要对 δ 和 θ 进行求解,计算式为:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912\cos(b) + \\ & 0.070257\sin(b) - 0.006758\cos(2b) + \\ & 0.000907\sin(2b) - 0.002697\cos(3b) + \\ & 0.00148\sin(3b) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta = (t - 12) \times 15^\circ \quad (4)$$

式中: b —对于具体的每一天而言为一固定天文无量纲参数,通过查表可得; t —时刻。

巨鼎式定日镜自身具备主推杆和副推杆,两个推杆分别绕着两个相互垂直的轴可以自由旋转。主推杆主要用来调整定日镜的俯仰角,副推杆主要用来调整定日镜的回转角。随着太阳高度角的不断变化,通过调整主推杆和副推杆的行程,实现其跟踪位置的即时调整。通过建立空间向量坐标系,根据实际光斑位置 (x'_0, y'_0, z'_0) ,可求解出定日镜镜面的实际法线向量 $\vec{i}'_0$ 。调整主、副推杆的行程指令不断修正 (x'_0, y'_0, z'_0) ,最终使其与定日镜理论光斑位置 (x_0, y_0, z_0) 的偏差在可以接受的范围内。求解出此种情况下对应的定日镜镜面的法向量 $\vec{i}_0$,进而确定最终某一时刻下定日镜镜面中心坐标。

2.3 定日镜跟踪精度校正策略

2.3.1 临时局域网的搭建

为简化网络管理、抑制广播风暴的产生、提高网络的安全性,镜场控制系统网络将其子系统划分成多个虚拟局域网(VLAN)。定日镜控制系统和光斑校正系统分别处于各自独立虚拟局域网。虚拟局域网的设备按照地理位置进行分组,使用光纤进行串接形成环形网络,将每个环形网络的首、尾设备与三层网络交换机相连。定日镜控制系统网络组建完备后,在集控室工程师站的电脑上可同时访问定日镜系统和光斑校正系统虚拟局域网,进行定日镜跟踪

精度的校正工作。定日镜校正过程中须对定日镜进行监护,同时需目测核对光斑情况和气象情况,因此定日镜跟踪精度校正工作需就地开展。

由于定日镜控制系统和光斑校正系统分别处于各自独立的虚拟局域网之中,彼此相对独立无法互通,因此需要搭建临时局域网络来满足就地定日镜校正工作。临时局域网络搭建如图 3 所示。临时接入一台具有 WIFI 功能的路由器,相当于在定日镜控制系统虚拟局域网中增加一个接入点,用 RJ45 端口连接至定日镜控制箱的网络交换机上,其 IP 地址应与交换机处于同一网段,并与该虚拟局域网其它设备无冲突。使用一台便携电脑作为工程师站电脑运行定日镜调试,使用 RJ45 端口连接至临时路由器。使用另外一台便携电脑运行光斑校正系统软件充当光斑校正系统服务器,使用 RJ45 端口连接至临近的光斑校正系统摄像头控制箱内的网络交换机上,该便携电脑通过 WIFI 信号连接至临时路由器。这样定日镜控制系统和光斑校正系统的两个虚拟局域网就可以互通,运行定日镜调试软件的便携电脑可同时使用光斑校正系统采集到的数据,满足了定日镜调试软件的运行需求。

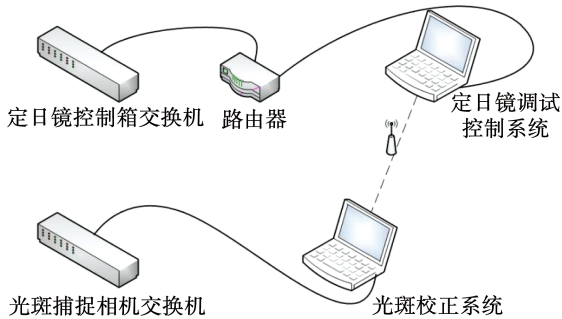


图 3 临时局域网搭建示意图

Fig. 3 Schematic diagram of temporary LAN construction

2.3.2 校正流程

启动定日镜控制系统和光斑校正系统。定日镜控制系统使定日镜处于预备位置,使得其反射光斑汇集到靠近靶面空间的某一位置。预备位置随着太阳高度角的变化也在不断变化。校正过程中定日镜按照预先设定好的程序依次轮流上靶进行校正。光斑捕捉相机分别拍摄光斑未上靶之前和光斑上靶稳定后的两张照片,在光斑校正系统中将二者的位置

坐标数据求差即可得出实际光斑坐标。将实际位置坐标数据反馈至定日镜控制系统,与该光斑的理论位置进行偏差计算和修正。由于每个定日镜的初始偏差不同,校正过程中每次修正的偏差幅度有限,因此可能有些偏差较大的定日镜需要进行多次校正才能满足要求。定日镜校正过程中光斑在吸热塔上的靶区位置如图 4 所示,该光斑在光斑校正系统上的识别数据如图 5 所示。



图 4 实际光斑

Fig. 4 Actual spot

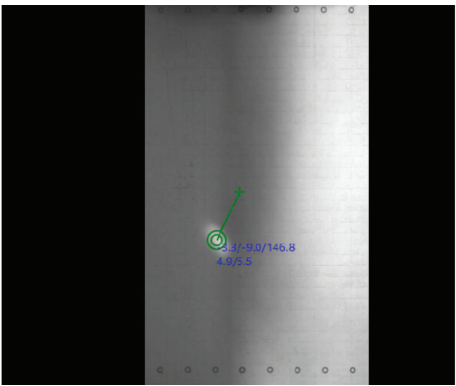


图 5 有效光斑数据

Fig. 5 Effective spot data

2.4 定日镜跟踪精度合格的判定标准

定日镜光斑校正完成后,需要采用光斑数据分析软件对校正后的定日镜跟踪精度进行判断,主要的判断依据为:(1) 太阳上升及降落期间,太阳高度角在 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 间均至少有 1 个有效数据点;(2) 太阳高度角大于 15° 时,在此时间段内至少每 2 个小时内有 1 个有效数据点;(3) 光斑总有效数据点的个数不少于 5,精度不超过 1.2 mrad 。

3 影响定日镜跟踪精度校正合格率的主要因素及应对策略

3.1 风速

光斑校正系统采集的是光斑在靶面上稳定时的光斑数据。因此,风速较大时定日镜的晃动会造成校正系统识别数据错误或者无法识别。图 6 为风速对定日镜校正合格率的影响情况(DNI 值稳定在 800 W/m^2 以上、镜面清洁系数大于 0.7)。由图 6 可知,随着风速的增大,定日镜的校正合格率逐渐降低。当风速 $\leq 5 \text{ m/s}$ 时,定日镜的校正合格率能够稳定在 60% 以上。当风速超过 10 m/s 时,由于光斑晃动较大,相机不能有效捕捉光斑数据,校正合格率随风速增大而迅速降低。因此,当风速超过 10 m/s 时不建议进行定日镜跟踪精度的校正工作。另一方面,从定日镜本身结构出发,风速较大时进行校正,镜面承受较大的风载荷,容易造成设备损坏,一般建议风速超过 15 m/s 时,需要将定日镜置于安全位置。

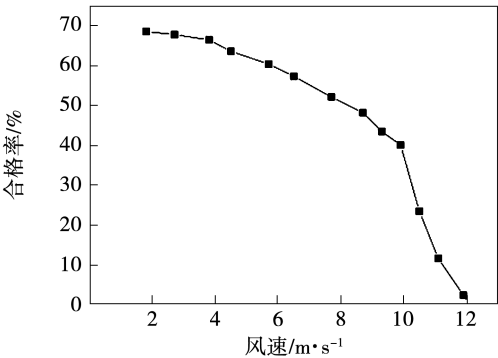


图 6 风速对校正合格率的影响

Fig. 6 The influence of wind speed on the qualified rate of calibration

3.2 云层及太阳直接辐射(DNI)

光斑校正获取光斑坐标数据原理是对光斑上靶前、后照片的坐标数据求差计算,从本质上讲,光斑与靶面的色差决定了光斑数据的识别效果。因此,当云层较厚特别是光斑靶面背景受到云层影响时,光斑数据通常无法采集。此外, DNI 对定日镜的校正合格率也有较大影响,图 7 给出了 DNI 变化对定日镜校正合格率的影响情况(风速 $\leq 5 \text{ m/s}$ 、镜面清

洁系数大于 0.7)。由图可知,当 DNI 较弱时也会导致光斑数据无法采集。校正过程中,当 DNI 值超过 300 W/m^2 时,才能采集光斑数据。随着 DNI 值的进一步增大,定日镜的校正合格率逐渐增大。DNI 值超过 800 W/m^2 时,定日镜的校正合格率能够达到 60% 以上。

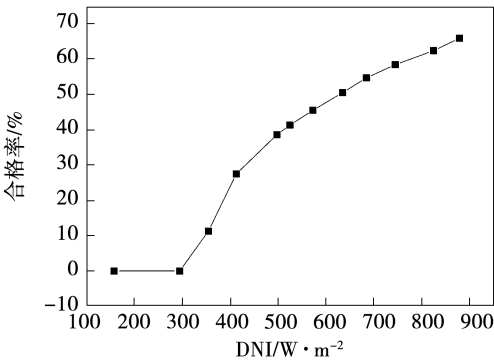


图 7 DNI 对校正合格率的影响

Fig. 7 The influence of DNI on the qualified rate of calibration

3.3 镜面清洁系数

镜面清洁系数直接影响定日镜反射光斑在靶面上的投射效果,镜面清洁系数很低时靶面上的光斑很弱,光斑校正系统无法获得有效数据。图 8 给出了镜面清洁系数对定日镜校正合格率的影响情况 ($\text{DNI} \geq 800\text{ W/m}^2$ 、 $\text{风速} \leq 5\text{ m/s}$)。镜面清洁系数大于 0.55 时,定日镜光斑才能被光斑捕捉相机识别,随着镜面清洁系数的进一步增大,定日镜的校正合格率进一步提高。当镜面清洁系数超过 0.7 时,定日镜的校正合格率能够达到 60% 以上。

当定日镜表面清洁系数较低时,光斑与靶面色差较小,需要采用专用的定日镜清洗车进行镜面清洗,清洗后的镜面清洁系数达 0.9 以上,可有效提升定日镜跟踪精度的校正合格率。此外,在进行定日镜跟踪精度的校正过程中,应该根据实际情况,周密安排定日镜镜面清洗计划,保证定日镜校正的合格率。

3.4 校正系统及临时局域网的稳定性

定日镜控制系统、光斑校正系统及临时局域网的稳定性对于定日镜跟踪精度校正具有重要影响。

在进行定日镜光斑校正工作中,通过不断对定日镜控制系统、光斑校正系统的控制程序进行优化,使得校正软件的稳定性得到很大程度提高。在不断优化定日镜系统和光斑校正系统各自所处的独立虚拟局域网的同时,采用质量更优的通信电缆及路由器等相关材料和设备,以保证定日镜跟踪精度校正过程中临时局域网的稳定性。

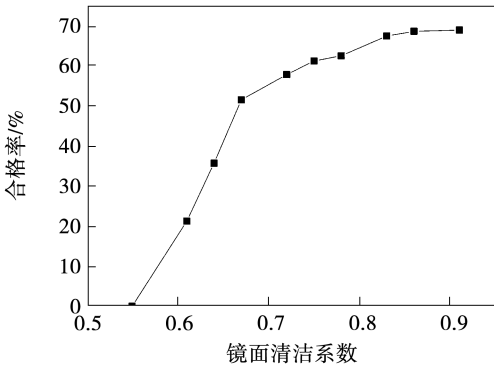


图 8 镜面清洁系数对校正合格率的影响

Fig. 8 The influence of mirror cleanliness factor on the qualified rate of calibration

4 结 论

对塔式光热电站定日镜的跟踪精度校正技术进行了研究,分析了该定日镜的结构特点,指出了进行定日镜跟踪精度校正的必要性,对校正的理论依据进行了阐述。从临时局域网的搭建、校正流程和校正合格的判定标准等方面对定日镜跟踪精度校正的基本策略进行研究。分析了风速、云层、DNI、镜面清洁系数、校正系统及临时局域网的稳定性等因素对校正结果的影响,提出了具体的应对策略。研究表明,当风速小于 5 m/s 、DNI 值大于 800 W/m^2 且镜面清洁系数超过 0.7 时定日镜跟踪精度的校正合格率能够达到 60% 以上。研究内容在提高定日镜跟踪精度的校正效率、缩短镜场的调试周期等方面具有重要参考意义。

参考文献:

[1] 田 行,刘立群,葛 竹,等. 大型阵列式太阳能热发电定日镜

跟踪系统设计[J]. 太原科技大学学报,2016,37(1): 27-31.

TIAN Xing, LIU Li-qun, GE Zhu, et al. Heliostat tracking system design for large-array type solar thermal power generation[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2016, 37 (1): 27-31.

[2] 耿其东,朱天宇,陈 飞. 塔式太阳能热发电中的定日镜跟踪系统设计[J]. 热力发电,2009,38(2): 81-83.

GENG Qi-dong, ZHU Tian-yu, CHEN Fei. Design of heliostat tracking system used in tower type solar energy thermal power generation[J]. Thermal Power Generation,2009,38(2): 81-83.

[3] PIROOZMAND P, BOROUSHAKI M. A computational method for optimal design of the multi-tower heliostat field considering heliostats interactions[J]. Energy,2016,106: 240-252.

[4] MAX P, DANIEL M Q, PETER S, et al. High accuracy data-driven heliostat calibration and state prediction with pretrained deep neural networks[J]. Solar Energy,2021,218: 48-56.

[5] 程 松,谢文韬,王 魏,等. 定日镜跟踪的误差源分析及其算法改进[J]. 太阳能学报,2020,41(9): 248-256.

CHENG Song, XIE Wen-tao, WANG Wei, et al. Error component analysis of heliostat tracking and its improved algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2020,41(9): 248-256.

[6] 孙飞虎,郭明焕,白凤武,等. 定日镜跟踪纠偏策略综合应用研究[J]. 太阳能学报,2014,35(7): 1272-1279.

SUN Fei-hu, GUO Ming-huan, BAI Feng-wu, et al. Integrated application of heliostat of tracking correction strategies[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2014,35(7): 1272-1279.

[7] 孙飞虎,王志峰,郭明焕,等. 基于跟踪轴参考位错位法的定日镜自动纠偏系统[J]. 太阳能学报,2016,37(4): 877-883.

SUN Fei-hu, WANG Zhi-feng, GUO Ming-huan, et al. Automatic heliostat tracking correction system based on a tracking angle bias strategy [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37 (4): 877-883.

[8] 张旭中,李 伟,黄圆明,等. 塔式太阳能热发电中定日镜的精度检测方法[J]. 太阳能,2020(4): 62-70.

ZHANG Xu-zhong, LI Wei, HUANG Yuan-ming, et al. Methods for detecting accuracy of heliostats in tower type CSP power generation [J]. Solar Energy,2020(4): 62-70.

[9] 徐 骥,杜 蕙,周 洪,等. 塔式太阳能电站三轴定日镜装置研究[J]. 热力发电,2019,48(7): 92-96.

XU Ji, DU Hui, ZHOU Hong, et al. Study on three-axis heliostats for solar-thermal power stations [J]. Thermal Power Generation, 2019,48(7): 92-96.

[10] 杨 琛,薛 铮,方彦军,等. 塔式太阳能镜场三轴支撑定日镜控制装置[J]. 热力发电,2018,47(12): 35-40.

YANG Chen, XUE Zheng, FANG Yan-jun, et al. Three-axis support heliostat control device in tower solar energy mirror field[J]. Thermal Power Generation,2018,47(12): 35-40.

[11] VICTOR G, KYPROS M, MANUEL B. Sun tracking by heliostats with arbitrary orientation of primary and secondary axes[J]. Solar Energy,2020,207: 1384-1389.

[12] 王心愉,李 岚,郭明焕,等. 方位-俯仰双轴跟踪定日镜的跟踪实践[J]. 太阳能学报,2020,41(11): 212-219.

WANG Xin-yu, LI Lan, GUO Ming-huan, et al. Tracking practice of an azimuth-elevation dual-axis heliostat[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2020,41(11): 212-219.

[13] 冯 涛,李 擎,王常策,等. 基于 STM32 的塔式太阳能热发电定日镜双轴控制实验系统设计与实现[J]. 实验室研究与探索,2021,40(2): 133-138.

FENG Tao, LI Qing, WANG Chang-ce, et al. Design and implementation of tower solar thermal power generation heliostat two-axis control experiment system based on STM32 [J]. Research and Exploration in Laboratory,2021,40(2): 133-138.

[14] 王凯丽,朱慧君. 塔式太阳能热发电镜场的边界优化[J]. 热能动力工程,2020,35(7): 201-206.

WANG Kai-li, ZHU Hui-jun. Boundary optimization of tower solar thermal power generation heliostat[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(7): 201-206.

[15] JOHANNES C S, MARC R, PETER S, et al. Review of heliostat calibration and tracking control methods[J]. Solar Energy,2020,207: 110-132.

(丛 敏 编辑)