

## 汽轮机低压缸安装标高超差处理分析及思考

陈达平

中核国电漳州能源有限公司 福建漳州

**【摘要】**某核电厂 1 号机组汽轮机 LP2 低压外缸安装期间，发现外缸标高无法调整名义尺寸，直接影响汽轮机后续安装工作，导致常规岛扣缸主线整体滞后数月。本文针对该故障现象进行根本原因分析，并通过计算分析进行处理方案论证，为同类机型类似故障处理提供参考。同时对根本原因进行深入思考，为批量化机组建设及同机型电厂提供参考借鉴，避免类似故障的重发。

**【关键词】**汽轮机；标高超差；汽缸补偿器；安装偏差；照配

**【收稿日期】**2023 年 11 月 17 日 **【出刊日期】**2023 年 12 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20230033

### Analysis and consideration on the handling of the installation standard of low pressure cylinder of steam turbine

Daping Chen

Sinonuclear Guodian Zhangzhou Energy Co., LTD., Zhangzhou, Fujian

**【Abstract】** During the installation of LP2 low pressure outer cylinder of turbine of Unit 1 of a nuclear power plant, it was found that the outer cylinder elevation could not adjust the nominal size, which directly affected the subsequent installation of the turbine, resulting in the overall lag of the main line of the conventional island cylinder for several months. In this paper, the root cause of the fault phenomenon is analyzed, and the treatment scheme is demonstrated through calculation and analysis, which provides a reference for similar fault treatment of similar models. At the same time, the root causes are deeply considered to provide reference for the construction of batch units and power plants of the same type, so as to avoid the recurrence of similar failures.

**【Keywords】** Steam turbine; Mark high difference; Cylinder compensator; Installation deviation; Matching

#### 引言

某核电厂采用具有完整自主知识产权的华龙一号三代核电技术，每台机组配备 1 台百万千瓦级汽轮机，其功能是将蒸汽热能转化成旋转机械能，从而带动发电机旋转发电。核电汽轮机作为常规岛最关键设备，担负着重要的中坚功能，直接关系到核能发电安全和效率。该电厂汽轮机为单轴、一次中间再热、三缸四排汽凝汽式半速核电汽轮机组。

该电厂在 1 号机组 LP2 低压外缸安装过程中，发现 LP2 外缸标高无法调整名义尺寸，进而导致汽缸补偿器错位无法安装，严重制约汽轮机扣缸主线工期。本文对现场安装偏差进行原因分析，制定针对性解决措施，对方案进行计算分析论证，并简要对比同行机型的情况论证说明。同时对根本原因进行深入

思考，力求为同类型机组电厂及后续批量化机组提供借鉴参考，避免类似故障的重发。

#### 1 设备简述

该机组汽轮机每个低压缸配备有 4 个汽缸补偿器，汽端、励端各 2 个，汽缸补偿器布置于外缸端板与内缸猫爪钢支墩之间，用于补偿机组热态工况下的膨胀及汽缸密封。每个低压缸配备有 2 个轴封补偿器，汽端、励端各 1 个，轴封补偿器布置于排汽扩散段与端部汽封之间，用于补偿机组热态工况下的膨胀及汽缸密封<sup>[1]</sup>。结构简图详见图 1 所示。

#### 2 安装偏差概况

##### 2.1 安装偏差描述

2022 年 12 月，1 号机组常规岛汽轮机安装期间，执行 LP2 外下缸位置调整和数据测量工作时，安装

单位现场测量发现 LP2 外下缸标高数据偏高约 6-7mm，现场标高数据详见表 1 所示。现场已无法通过低压外缸猫爪处调整垫片进行标高调整。LP2 标高超差导致汽缸补偿器错位无法安装，汽缸补偿器必须在内缸安装前套入，否则无法进行后续安装工作，该安装偏差严重制约汽轮机扣缸主线工期。

### 2.2 安装偏差原因分析

通过现场勘察、设计图纸标准复核、安装记录查验、现场数据复测等方面进行深入分析，对造成标高超差的多种可能性进行逐一分析论证。经核实，造成此问题的直接原因是外缸支撑猫爪底面距离汽缸中分面的高度尺寸超差造成的，该尺寸名义值是 1415mm，现场实测为 1421~1423mm 之间。通过溯源分析，其根本原因为厂家制造缺陷、验收质量把关不严，促成原因为汽轮机安装风险识别不足。

### 3 现场处理措施

通过对多种处理方案进行了充分的论证，考虑到现场的处理工期、处理难度、现场修复条件等因素，对与之相关联的部件进行全面梳理和分析，最终决定采用维持汽缸现有标高不变的情况下，通过照配轴封补偿器和汽缸补偿器的方案。具体照配方案

如下：

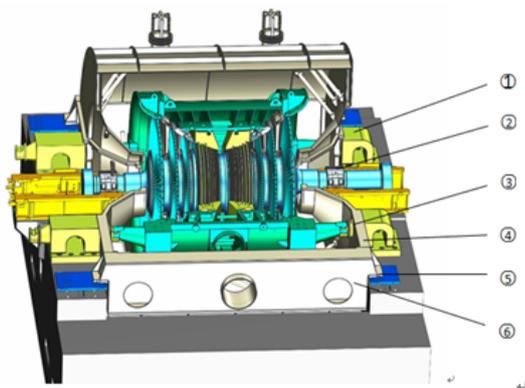
#### 3.1 轴封补偿器照配方案

轴封补偿器的配合关系如图 2 所示，其一端通过法兰与外缸排汽扩散段相连接，另一端通过法兰与与低压缸端部汽封体相连接。由于端部汽封体与固定在基础上的轴承座刚性固定，因此该补偿器主要功能为隔绝大气，并补偿外缸的变形量<sup>[2]</sup>。根据表 1 数据，外缸四只猫爪整体抬高量为 6.15~7.19mm 之间，照配方案为将补偿器与扩散段连接的法兰螺孔在厂家加工时节圆整体向上偏置 6.5mm。

#### 3.2 内缸猫爪补偿器照配方案

内缸猫爪补偿器的配合关系如图 3 所示，其一端通过法兰与外缸端板相连接，另一端通过法兰与内缸支撑钢支墩的凸台相连接，法兰之间均设置有密封圈。由于支撑内缸的钢支墩直接固定于基础上，因此该补偿器主要功能为隔绝大气，并补偿外缸的变形量以及安装偏差。

受补偿器结构限制，其与外缸端板连接的法兰螺栓孔节圆偏置无法全部补偿外缸的抬高量，因此方案按照 3.5mm 偏置量进行照配，剩余的 2.65~3.69mm 安装时靠波纹节补偿。如图 4 所示。



1. 低压内缸钢支墩；2. 轴封补偿器；3. 汽缸补偿器；4. 低压外缸下半端板；  
5. 低压外缸猫爪支撑；6. 低压外缸下半侧板

图 1 低压缸结构简图

表 1 LP2 标高数据记录表

序号	测量位置	标高标准 mm	现场标高数据 mm	偏差数值 mm
1	LP2 电端左侧	+350±1	356.4	6.4
2	LP2 电端右侧	+350±1	356.15	6.15
3	LP2 汽端左侧	+350±1	357.14	7.14
4	LP2 汽端左侧	+350±1	357.19	7.19

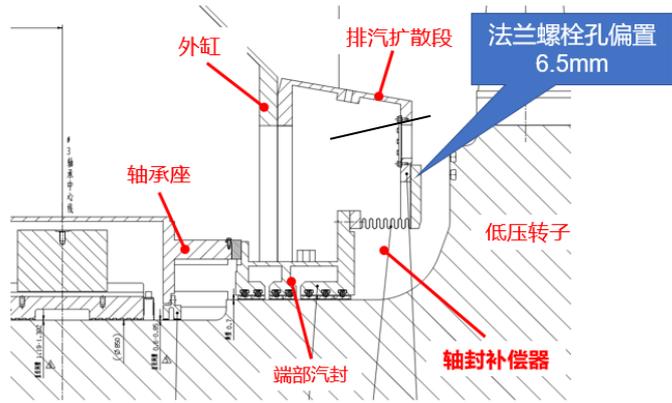


图 2 轴封补偿器结构示意图

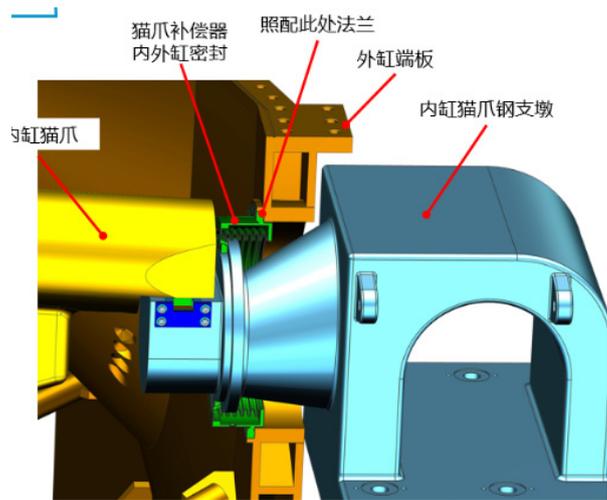


图 3 内缸猫爪补偿器结构示意图

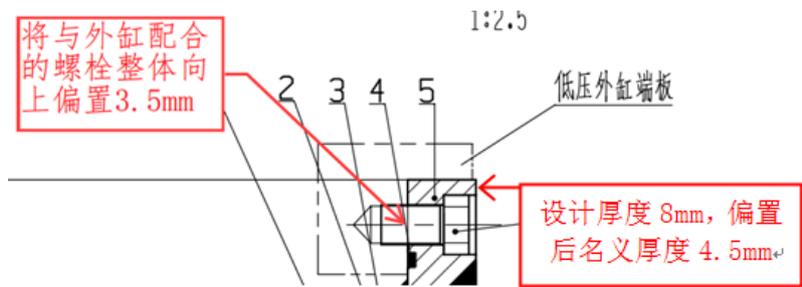


图 4 内缸猫爪补偿器照配示意图

#### 4 处理方案分析

汽缸补偿器设计使用寿命 60 年，若在机组运行中出现损坏将直接影响凝汽器真空，故障处理需将低压内缸进汽管、底部凝汽器抽汽管全部割开，把下半内缸吊出才可进行补偿器更换，整个维修周期需长达数月，将造成电厂巨大经济损失，故目前安装的质量直接影响汽轮发电机组是否能安全、稳定运行

60 年，故需对方案可行性进行充分分析论证。

##### 4.1 技术可行性初步分析

根据现场外缸安装时实测数据，LP2 低压外缸中分面标高比理论值高出约 6~7.2mm。本机型低压内缸不直接支撑于外缸上，而是支撑在固定于基础上的钢支墩上，因此外缸标高的变化不会影响机组的动静间隙，不会影响机组的安全运行，从技术角度

上初步分析是可行的。

### 4.2 内缸猫爪补偿器设计寿命

#### 4.2.1 外缸热胀方向说明

本机型低压外缸由四只猫爪支撑于基础上，外缸的轴向死点位于调阀端的两只猫爪处，整个外缸向电机端膨胀；外缸的横向死点位于外缸下半中心处的横向定位销处，外缸以此为中心向两边膨胀；由于凝汽器底部由弹簧支撑，因此外缸&凝汽器垂直方向的死点位于外缸猫爪处，外缸以此为基准向上/向下膨胀。内缸猫爪补偿器中心线标高略高于外缸猫爪<sup>[3]</sup>。

#### 4.2.2 补偿器补偿量计算

低压外缸材质为 Q235B，线胀系数为  $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。外缸猫爪支撑面距离补偿器中心的竖直向高度差值为 310mm，机组中心线距离补偿器中心线的横向距离为 3900mm。外缸的死点位于调阀端猫爪处，电机端端板距离死点 10960mm。

内缸猫爪支墩因处于环境温度，其膨胀量不予考虑。因此外缸在热态下的膨胀量即为补偿器需补

偿的运行胀缩量。设计环境温度按  $20^\circ\text{C}$  考虑，机组正常运行时按照排汽温度相对较高的能力工况（CCR）考虑，排汽温度为  $49^\circ\text{C}$ 。汽轮机低压外缸运行的最高排汽温度为跳机工况，此时排汽温度为  $110^\circ\text{C}$ 。该工况为罕见短期工况，不作为补偿器设计寿命计算依据。

#### 4.2.3 补偿节结构特征和设计寿命

该补偿器为一外压补偿器，采用双层 0.8mm 不锈钢板整体压制而成。补偿器外压为大气压（0.1MPa），内压为凝汽器真空。机组正常运行时，补偿器径向综合补偿量只有 1.36mm，寿命计算按 2mm 考虑，电机端补偿器轴向补偿量为 3.82mm，寿命计算按 6mm 考虑，按照美国膨胀节制造商协会标准（EJMA）中寿命计算方法，计算补偿器的可循环次数超 62 万次，远远大于汽轮机机组 60 年使用寿命期内的总起停次数（大于 1 万次）的需求<sup>[4]</sup>。

机组跳机工况作为一种极端工况，不适宜作为部件寿命设计的依据。按照径向热态偏差 4.23mm 计算，补偿器的可循环次数为 11639 次。

表 2 补偿器各向热态胀差

序号	参数	正常工况	跳机工况	补偿器许用位移
1	排汽温度	$49^\circ\text{C}$	$110^\circ\text{C}$	
2	竖直向补偿量	0.11mm	0.34mm	非疲劳循环 10mm
3	横向补偿量	1.36mm	4.22mm	疲劳循环 5mm
4	轴向补偿量（调阀端）	0mm	0mm	非疲劳循环 $\pm 30\text{mm}$
5	轴向补偿量（电机端）	3.82mm	11.8mm	疲劳循环 $\pm 20\text{mm}$

表 3 补偿器计算循环次数

设计参数	设计压力: 0.1MPa(a)	设计温度: $100^\circ\text{C}$	安装温度: $20^\circ\text{C}$	吸收的位移: 轴向 6mm, 横向: 2mm
波形参数	波纹直边外径: $\phi 884\text{mm}$	波距×波高 $35 \times 36\text{mm}$	壁厚×层数 $0.8\text{mm} \times 2$	波数: 6 个
计算结果	疲劳次数: 622312 次			

### 4.3 补偿器安装偏差的影响分析

#### 4.3.1 波纹节的剪切应力分析

按照现场测量的外缸与钢支墩的相对位置关系以及外缸的抬高量数据，该补偿器法兰节圆偏置 3.5mm 后，高度方向需要波纹节补偿的量仅剩余 2.65~3.69mm。

即其理论竖直方向最大中心偏差量为 3.69mm，理论横向中心偏差量为 0mm。考虑 1mm 的误差因素，叠加热态运行时汽缸的膨胀量，进行模拟计算，

竖直向中心的偏差量为  $4.69+0.11=4.90\text{mm}$ ，横向偏差为  $1+1.36=2.36\text{mm}$ ，综合径向膨胀偏差为 5.44mm。补偿器径向刚度为 13088N/mm，补偿 5.44mm 会使得补偿器承受径向 71199N 的力，波纹节的环形面积为  $4423\text{mm}^2$ ，由此波纹节上受到的剪切应力约为 16.10MPa。波纹管的许用剪切应力为 79.8MPa（0.7 倍屈服强度需用值，屈服强度许用值按 1.5 倍安全系数），仍有较大的安全裕度。

极端跳机工况下（ $110^\circ\text{C}$ ），叠加热态汽缸的膨

胀量, 竖直向中心的偏差量为  $4.69+0.11=4.90\text{mm}$ , 横向偏差为  $1+4.22=5.22\text{mm}$ , 综合径向膨胀偏差为  $7.16\text{mm}$ 。由此波纹节上受到的剪切应力约为  $21.19\text{MPa}$ 。

根据上述分析, 由于安装偏差导致补偿器横向受力后, 波纹节的剪切应力比最大只有  $0.27$ , 即补偿器的径向变形仍为弹性变形, 不影响补偿器的设计使用循环次数。

#### 4.3.2 波纹节端部焊缝的应力分析

波纹管与两端接头焊接时在波纹的内侧设置有  $2\text{mm}$  厚度的环形焊缝, 由此最大焊角高度为  $1.6+2=3.6\text{mm}$ , 考虑到 V 形破口焊脚的不均匀性, 计算按照  $1.8\text{mm}$  考虑, 由此环形焊缝的面积为  $4976\text{mm}^2$ 。

根据 4.3.1 分析, 机组正常运行时由于安装偏差作用在补偿器的径向力为  $71199\text{N}$ , 跳机工况温度 ( $110^\circ\text{C}$ ) 下对应的径向力为  $93703\text{N}$ , 由此焊缝所承受的剪切应力分别为  $14.31\text{MPa}$  和  $18.83\text{MPa}$ 。焊条材质为 E347, 其  $110^\circ\text{C}$  下的屈服强度为  $137\text{MPa}$ , 许用剪切应力为  $96\text{MPa}$ , 作为焊缝, 许用强度按 8 折考虑, 则其最终的许用强度为  $78\text{MPa}$ , 安全裕度还很大, 焊缝是足够安全的。

#### 4.3.3 法兰密封性的影响

由于法兰螺栓个数、规格和拧紧力矩均未发生变化, 因此不会对法兰密封造成影响。按照螺栓拧紧力矩计算, 冷紧后法兰接触面上接触应力见表 4, 按照密封考核标准, 接触应力大于两倍部件所承受压差 ( $0.2\text{MPa}$ ) 即可达到密封。

#### 4.3.4 法兰强度分析

法兰螺栓节圆偏置并对所有螺栓扩孔后, 个别螺栓孔剩余壁厚减薄, 针对照配前后两种情况进行有限元分析计算, 结果如图 5 所示。法兰整体应力水平比较低, 照配前后, 无明显变化, 此处运行环境无内压, 且温度很低。

#### 4.4 同类机组补偿器对比

本机型内缸猫爪补偿器结构和尺寸与某厂百万千瓦超超临界火电机组相似, 超超临界机型系列至今已投运超 100 台, 最早的浙江玉环电厂距今已投运近 17 年。由于火电机组低压缸和凝汽器支撑方式与本机型有较大差异, 因此火电机组中类似补偿器的垂直向热态位移比本项目要大得多。

百万千瓦等级超超临界机组低压外缸直接与凝汽器焊接, 且无支撑于基础上的猫爪, 因此凝汽器和低压缸的热胀一直会从凝汽器传递到内缸猫爪补偿器处。该补偿器距离零米层的标高有近 18 米, 所以补偿器在热态的径向位移补偿量超过  $6.3\text{mm}$ , 考虑  $110^\circ\text{C}$  排汽温度的话, 该补偿量会达到  $19.5\text{mm}$ 。而本机型机组热态运行的猫爪补偿器径向补偿量仅仅只有  $2\text{mm}$ , 考虑  $110^\circ\text{C}$  排汽温度径向补偿量也只有  $4.22\text{mm}$ , 与之相比显然小得多。由于火电机组低压外缸直接坐落于凝汽器上, 而外缸&凝汽器的垂直向死点又位于凝汽器底部, 因此当外缸与凝汽器焊接后, 焊缝收缩势必会造成外缸产生移位, 从而造成补偿器在安装状态产生径向变形。补偿器用于补偿适当的安装偏差是常见现象。

表 4 补偿器法兰面接触应力计算

序号	汽缸侧法兰密封面		钢支墩处法兰密封面	
	参数	数值	参数	数值
1	螺栓数量	36 个	螺栓数量	16 个
2	补偿器法兰与汽缸法兰接触面积	$142319\text{mm}^2$	补偿器法兰与钢支墩法兰接触面积	$31393\text{mm}^2$
3	单个螺栓对补偿器法兰作用力	$97389\text{N}$	单个螺栓对补偿器法兰作用力	$97389\text{N}$
4	补偿器整体受力	$3506017\text{N}$	补偿器整体受力	$1558229\text{N}$
5	补偿器法兰与汽缸法兰接触面压应力	$24.63\text{MPa}$	补偿器环与钢支墩法兰接触面压应力	$90.48\text{MPa}$
6	要求	$>0.2\text{MPa}$	要求	$>0.2\text{MPa}$
7	是否合格	合格	是否合格	合格

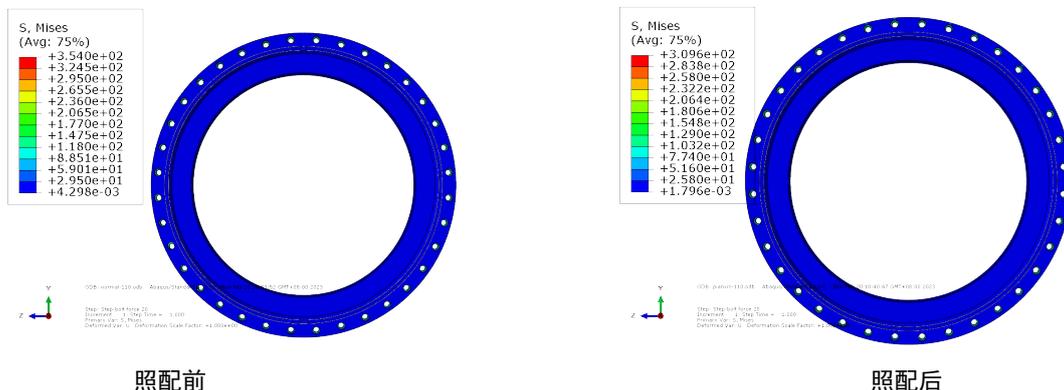


图 5 法兰照配前后法兰的整体应力图

表 5 本机型与超超临界火电机组补偿器使用的对比

序号	项目	本机型	超超临界机型
1	凝汽器支撑方式	弹簧	刚性
2	低压外缸与凝汽器的连接方式	刚性焊接	刚性焊接
3	低压外缸的支撑方式	支撑于基础	支撑于凝汽器
4	外缸-凝汽器垂直向死点	外缸猫爪	凝汽器底部
5	补偿器中心距离死点的距离	0.31m	17.79m
6	热态下猫爪补偿器的垂直向位移	0.11mm	6.3mm
7	110℃下补偿的垂直向位移	0.34mm	19.5mm

### 5 思考

汽轮机安装过程，低压外缸标高超差较为少见，本次缺陷处理长达数月，对常规岛安装主线及后续机组运行影响深远。为了避免类似故障再次发生，建议同机型电厂及后续批量化机组建设，需从根源上下功夫，筑牢设计、制造、品控、验收、安装各道安全屏障：

(1) 关注汽轮机设计、制造、安装各个环节，建立起设计、制造、安装各环节安全屏障。充分吸取 1 号机组标高超差问题，经验反馈至后续批量化建设机组，从设计源头解决低压外缸支撑猫爪底面至汽缸中分面的高度尺寸超差问题，从制造源头解决制造工序质量控制及工艺标准与设图纸标准不符问题，从安装源头解决安装风险点把控及安装逻辑优化调整问题。同时及时总结发掘首台机组安装过程中的问题并汲取已投产同类型机组的安装经验，以保证批量化机组建设的安装质量。

(2) 识别汽轮机安装风险点，加强安装主线重大风险点预研判，如在同行电厂也曾发生过汽缸补偿器、轴封补偿器安装偏差相关经验反馈，极易制约

主线工期，建议后续批量化建设机组在汽轮机安装阶段协调汽缸补偿器、轴封补偿器尽早供货，并寻找安装窗口提前试装，避免制约安装主线情况。

### 6 结束语

本文对安装标高超差事件进行原因分析，由于设计、制造、安装阶段的多道屏障突破导致汽轮机安装主线工期滞后数月的惨痛后果。本文通过计算分析及同机型对比，论证该修正方案的可行性，可供同类故障处理提供思路。通过照配轴封补偿器和汽缸补偿器的方案，能够有效解决汽轮机低压外缸标高超差问题<sup>[5]</sup>。

同时只有从根源上下功夫、防微杜渐，建立起设计、制造、品控、验收、安装各环节安全屏障，才能从根源避免类似事件再次发生，以保证机组的安装质量、运行安全，以及机组的经济性。

### 参考文献

[1] 上海汽轮机厂，汽轮机安装说明书，2020。  
 [2] DL5190.3-2012，电力建设施工技术规范第 3 部分：汽轮发电机组[S]。北京：中国电力出版社，2012

- [3] 孙康娜, 贺小忠. “华龙一号”核电汽轮机创新设计特点[J]. 热力透平, 2017,46(2):93-97.35(1): 1-7. 147 -148.
- [4] 张道伟. 《金属波纹管膨胀节通用技术条件》(GB/T 12777—2019)波纹管疲劳设计及建议[J],[2023-10-02].
- [5] 张伟江,唐广通,张营,等.汽轮机低压缸膨胀受阻导致的振动异常原因分析及处理[J].汽轮机技术, 2023, 65(2):

**版权声明:** ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**