

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.06.007

## 水泵启动时间对灌溉水力旋流器性能的影响

刘竹青, 郭 聪, 严海军

( 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为解决在水泵启动阶段圆锥型水力旋流器过滤性能较差的问题, 利用变频控制技术, 以 DN50 圆锥型灌溉用水力旋流器为研究对象, 对含沙质量分数分别为 0.451%、0.266% 和 0.124% 的 3 种水沙混合液分别进行了 5、15、30、60 和 90 s 的 5 种启动时间, 15、30、90 和 120 s 的 4 种启动时间以及 15、30、60 和 90 s 的 4 种启动时间的水沙分离性能试验研究。试验结果表明: 水泵启动时间越短, 大粒径颗粒的分离效果变差, 而启动时间越长, 小粒径颗粒的分离效果变差; 启动过程中水力旋流器的总分离效率及分级性能随时间均呈现先差后好最后趋于稳定的规律; 在相同启动时间的同一时刻下, 分级性能随颗粒粒径的增大呈现有规律的波动性变化, 0.2 mm 以上粒径级沙粒的分离效果最好。结合总分离效率规律, 推荐 DN50 圆锥型水力旋流器在工作流量为 15 m<sup>3</sup>/h 时的水泵最佳启动时间为 30 s。

**关键词:** 水力旋流器; 节水灌溉; 水泵启动时间; 变频控制; 分离性能

**中图分类号:** S277.9; S224.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)06-0492-05

Influence of pump start-up time on performance  
of hydrocyclone used in irrigation system

Liu Zhuqing, Guo Cong, Yan Haijun

( College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the poor separation performance of a conical hydrocyclone during the start-up time of a pump unit, taking the DN50 type hydrocyclone as a model, the experimental investigations into the effects of the pump start-up time on the separation performance were carried out using the working liquids with three sand mass fractions by means of the frequency-variable control technology. The start-up times 5, 15, 30, 90 and 120 s for the liquids with 0.451% sand mass fraction, 15, 30, 60 and 90 s for those with 0.266% and 0.124% fractions were applied, respectively. The experimental results showed that the shorter the start-up time, the poorer the separation performance for larger size particles; while the longer the start-up time, the poorer the performance for smaller size particles. During the start-up period, both the total separation efficiency and the classification performance of hydrocyclone are deteriorated initially, and then get better, eventually reach constant levels. At a certain time instance of the same start-up time, the classification performance presents a regular wavy variation with increasing size of particles. The particles larger than 0.2 mm in size achieve the best classification performance. It is recommended that the optimal start-up time is 30s when the pump works with the hydrocyclone at the flow rate of 15 m<sup>3</sup>/h.

**Key words:** hydrocyclone; water-saving irrigation; pump start-up time; frequency control; separation performance

收稿日期: 2011-08-25

基金项目: 北京市教委科学研究与科研基地建设基金资助项目(20090909)

作者简介: 刘竹青(1973—), 山西武乡人, 副教授, 博士(lzq@cau.edu.cn), 主要从事流体机械与工程研究。

郭 聪(1984—), 黑龙江七台河人, 硕士研究生(gucongcau@126.com), 主要从事灌溉水力旋流器研究。

水力旋流器以其结构简单、无转动部件及泥沙分离效率高等优点,常被用于高含沙量灌溉水的初级净化。许多研究者对水力旋流器的分离性能展开了理论研究<sup>[1-2]</sup>、分离效率试验研究<sup>[3-4]</sup>、旋流器结构对性能影响的试验研究<sup>[5-6]</sup>、不同处理条件下旋流器分离性能的试验研究等<sup>[7-8]</sup>,基本建立了水力旋流器试验方法及性能规律<sup>[9-10]</sup>,但关于水力旋流器进口水流条件对旋流器性能影响的试验研究鲜见报道。由于水泵机组在启闭过程中流量、扬程不稳定,进入水力旋流器的流速未达到设计工况,水流运动复杂。实际工程应用表明,水泵启闭时水力旋流器的分离性能下降,导致泥沙直接进入下游管道系统。目前节水灌溉工程应用变频控制技术已越来越广泛<sup>[11]</sup>,它可以实现精准控制水泵的启闭时间。因此文中将利用变频技术,对DN50圆锥型水力旋流器在不同水泵启动时间条件下的分离性能进行试验,分析水泵启动时间对水力旋流器总分离效率和分级性能的影响规律,提出水泵启动时间的推荐值,为水力旋流器的设计与运行提供技术依据。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

图1为水力旋流器性能试验装置示意图。

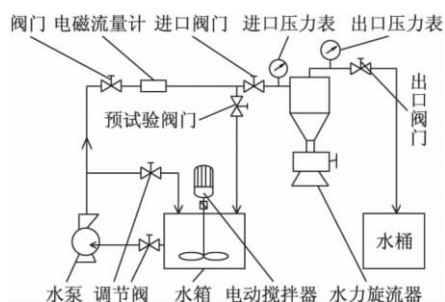


图1 水力旋流器性能试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental assembly for hydrocyclone performance

加压水泵型号为QDL16-50型立式多级节能泵,其额定流量为 $16 \text{ m}^3/\text{h}$ ,额定扬程为60 m,额定转速为 $2900 \text{ r/min}$ 。泵启动由变频器控制,变频器型号为SV150is5-4,启动加速时间可在 $0 \sim 6000 \text{ s}$ 内设置。电磁流量计的精确度为0.5级,误差为 $\pm 0.28\%$ 。进、出口压力表均为精密压力表,精度为0.4级,量程分别为 $1.0$ 和 $0.6 \text{ MPa}$ 。水箱的容积为 $2 \text{ m}^3$ ,配有电动搅拌器,在试验过程中可对混合

水沙进行连续搅拌,保持含沙体积分数不变。为了准确控制试验压力,在水泵进口和出口分流管上安装调节阀,在水力旋流器出口安装出口阀门。水力旋流器出口溢流液的采集采用容积为 $20 \text{ L}$ 的水桶。

### 1.2 试验材料

试验分清水和浑水两种工质,试验浑水由水和河沙按一定比例配置搅拌而成,河沙密度为 $2350 \text{ kg/m}^3$ 。用MT-2000型激光粒度分析仪测定河沙粒径分布情况,粒径区间分别为 $0.300 \sim 0.220$ ,  $0.220 \sim 0.200$ ,  $0.200 \sim 0.160$ ,  $0.160 \sim 0.125$ ,  $0.125 \sim 0.110$ ,  $0.110 \sim 0.100$ ,  $0.100 \sim 0.088$ ,  $0.088 \sim 0.074$ ,  $\leq 0.074 \text{ mm}$ 相对应的粒径分布分数分别为13.5%, 12.2%, 10.3%, 8.6%, 14.0%, 15.9%, 8.1%, 8.0%, 9.4%, 累积分布分数为13.5%, 25.7%, 36.0%, 44.6%, 58.6%, 74.5%, 82.6%, 90.6%, 100.0%。

### 1.3 试验方法

清水试验主要进行水力旋流器的压力流量特性试验,将出口阀门下游的水直接引入水箱。试验过程中关闭预试验阀门,进、出口阀门保持一定开度,通过调节阀门改变水力旋流器的进口压力和流量。

将泥沙颗粒质量与水沙混合液总质量之比定义为含沙质量分数。在浑水条件下进行了3种含沙质量分数的试验,分别为0.451%, 0.266%和0.124%。浑水试验前先进行预试验,关闭进口阀门,全开启预试验阀门,使进口阀门的上游管道内充满水沙混合液。待水泵运行稳定后全开启进口阀门,关闭预备试验阀门,调节进口阀门的开度保证旋流器工况维持在 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右,开始进行分离试验。

水力旋流器出口溢流液的含沙质量分数通过体积法测定。水泵启动采用线性均匀加速方式,设定6种启动时间,分别为5, 15, 30, 60, 90和 $120 \text{ s}$ 。溢流液样的接取时间视启动时间而定。当启动时间为 $5 \text{ s}$ 时,以 $1 \text{ s}$ 内水桶所盛的溢流液为计时单元。启动时间大于 $5 \text{ s}$ 时,当水泵小流量时以溢流液盛满1个水桶为计时单元,当水泵较大流量时,以溢流液盛满2个水桶为计时单元。由于溢流液样的接取至水泵由变频转为工频运行并进入稳定运行后才结束,因此试验过程中液样接取的总时间是变化的。每份溢流液样称质量后在平均温度为 $19.2^\circ\text{C}$ 、相对湿度为28.2%的室内静置沉淀2 d,然后用虹吸法分离出上层清液,将下层水沙混合液倒入自制的滤取设备中再自然晾干2 d,最后称取分离的沙样质量,用粒度

分析仪测定其粒度分布情况。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 压力流量特性

清水试验测得水力旋流器的进口压力  $p$  与流量  $Q$  变化关系如图 2 所示。可以看出: 进口流量随进口压力的上升而增大, 水力旋流器的进口压力 0.20 ~ 0.45 MPa 时的通过流量为 7 ~ 20  $\text{m}^3/\text{h}$ 。由进、出口压力之差可以得到清水条件下水力旋流器局部水力损失  $\Delta p$  与进口流量的关系如图 3 所示。当进口流量为 7 ~ 20  $\text{m}^3/\text{h}$  时, 水力旋流器的局部水力损失为 0.010 ~ 0.045 MPa。

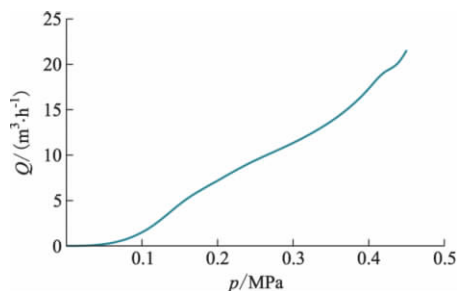


图 2 进口流量与进口压力关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between inlet flow rate and pressure

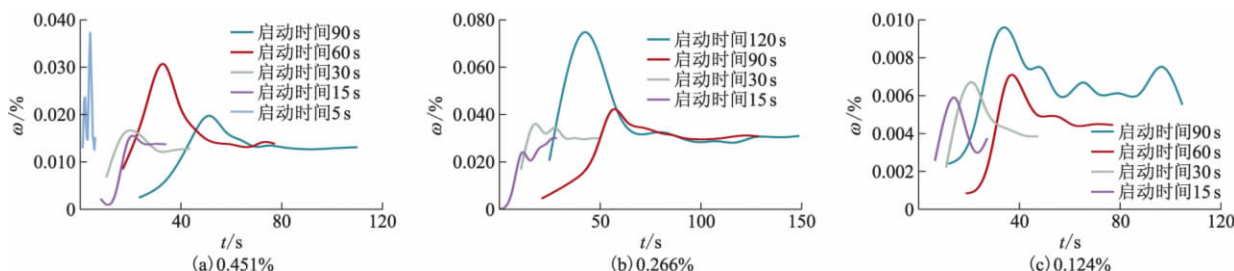


图 4 水沙混合液分离后含沙质量分数随时间变化曲线

Fig. 4 Relationship curves of sediment mass fraction after separation with time

由图 4 可以看出: 启动时间为 5 s 时, 分离后的溢流液含沙质量分数很高, 波动剧烈, 分离效果差, 实际上启动时间为 5 s 接近直接启动的条件, 这与工程应用中水泵直接启动旋流器分离效果较差相符; 启动时间超过 15 s 时, 分离后的溢流液含沙质量分数呈现先急剧增加、达到峰值后降低、最后趋于稳定的变化规律; 启动时间为 15 s 和 30 s 时, 分离后含沙质量分数相对较低, 变化平缓, 波动很小, 表明分离效率较高; 启动时间为 60 s 和 90 s 时, 分离后含沙质量分数的峰值增大, 分离效率下降; 启动时间为 120 s 时, 分离后含沙质量分数出现较大峰值,

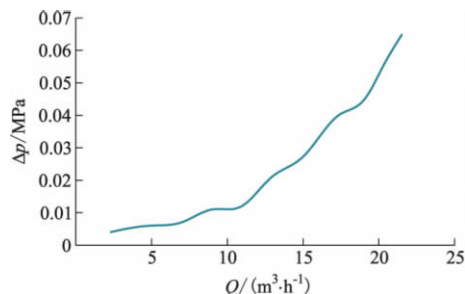


图 3 进口流量与局部水力损失关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between local loss and inlet flow rate

### 2.2 总分离效率

总分离效率反映了水力旋流器过滤分离水沙混合液中泥沙的总体能力。灌溉用水力旋流器分离出的沙粒经锥形底流管直接进入密封的储沙罐, 不易取样, 因此试验以采集的分离溢流液含沙质量分数作为水力旋流器总分离效率判定指标。溢流液含沙质量分数越低, 表明水力旋流器的总体分离效果越好, 总分离效率也就越高。含沙质量分数为 0.451% 的水沙混合液进行了 5, 15, 30, 60 和 90 s 5 种启动时间, 含沙质量分数为 0.266% 的水沙混合液进行了 15, 30, 90 和 120 s 4 种启动时间, 含沙质量分数为 0.124% 的水沙混合液进行了 15, 30, 60 和 90 s 4 种启动时间的试验。分离试验结果如图 4 所示, 图中: 横轴  $t$  为启动时间; 纵轴  $\omega$  为含沙质量分数。

表明启动时间内分离效率较差。试验结果表明: 适当延长水泵启动时间可以提高分离效率, 但超过一定时间(本试验 60 s)后, 使水力旋流器进口流量由零递增至正常流量的时间变长, 反而产生较低的流速变化梯度, 使分离沙粒所需的离心力不足, 致使分离效率降低。

### 2.3 启动时间对分级效率的影响

根据文献[12]给出的关于水力旋流器分离性能的参数指标和方法, 采用溢流分级效率  $G_o(d_i)$  比较水力旋流器对不同粒径级沙粒的分离净化效果,  $G_o(d_i)$  为一比值, 其值越小表明过滤分离效果越



好,计算公式如下:

$$G_o(d_i) = \frac{M_o f_o(d_i)}{M f(d_i)},$$

式中:  $M$ 、 $M_o$  分别为水力旋流器中进口和溢流液中的固相(沙粒)质量流量  $\text{kg/s}$ ;  $f(d_i)$ 、 $f_o(d_i)$  分别为

水力旋流器中进口和溢流液中含  $d_i$  粒径的质量分数 %.

试验得到了3种含沙质量分数条件下不同粒径区间沙粒的溢流分级效率的变化规律. 含沙质量分数为0.266%的溢流液分级效率变化如图5所示.

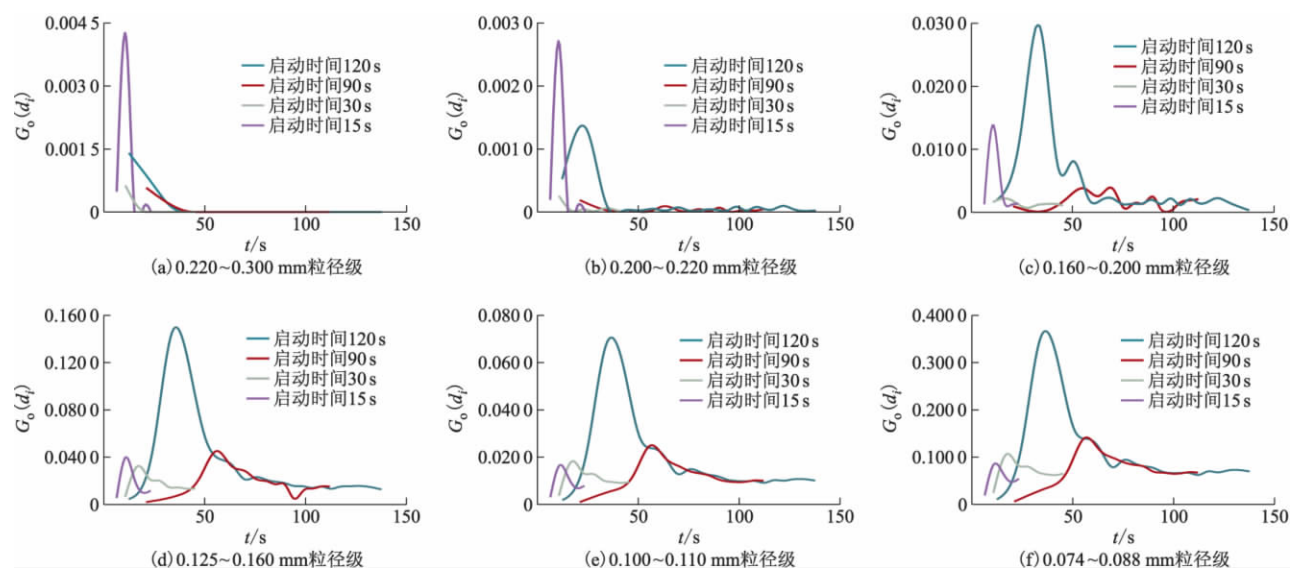


图5 不同沙粒粒径水沙混合液在不同启动时间下的溢流分级效率

Fig. 5 Overflow classification efficiency of water-sand mixture with different sand sizes at different start-up times

沙粒粒径越大,溢流分级效率值越小,表明水力旋流器的分离净化效果越好.由图5可以看出:对于相同启动时间条件下,各粒径区间沙粒的溢流分级效率值均呈现先增大再减小、最后趋于稳定的规律,这与水沙混合液分离总效率的变化趋势相同;比较同一启动时间的同一时刻下不同粒径的溢流分级效率,0.074~0.088 mm 粒径区间的溢流分级效率值最大,表明其分离效果最差;随着粒径的增大,溢流分级效率值显著下降,但在0.100~0.110 mm 粒径区间之后开始出现分级效率值上升的趋势,在0.125~0.160 mm 粒径区间处出现较小的极大值,但其值不足0.074~0.088 mm 粒径级沙粒分级效率值的一半;随着沙粒粒径的继续增大,溢流分离效率值逐渐减小最后趋于定值;启动时间为15 s和120 s时的溢流分级效率曲线不仅峰值大,而且波形变化剧烈;启动时间为30 s和90 s时的波形变化相对平缓.对于0.220~0.300 mm 粒径区间内的沙粒,分离效果由好变差的启动时间依次为30 s,90 s,120 s,15 s;对于0.200~0.220 mm 粒径区间内的沙粒,分离效果由好变差的顺序为30 s,90 s,120 s,15 s,但120 s的分级效率峰值已达到15 s时的一半,这说明短启动时间条件下,大粒径颗粒的分离效果较差;当粒径为0.160~0.200 mm 范围时,分离效果

由好变差的顺序变为30 s,90 s,15 s,120 s;沙粒粒径小于0.160 mm 时,尽管启动时间30 s是15 s的2倍,但分级效率较接近,两者之差小于20%,分离效果由好变差的顺序为15 s,30 s,90 s,120 s.试验还发现在90 s和120 s较长启动时间条件下,小粒径区间( $<0.200$  mm)范围内的沙粒分离效率均较差.

试验表明水力旋流器的过滤分离能力并非简单地随着沙粒粒径的增大而逐渐提升,而是受重力、离心力及旋流器内流场等因素综合的影响,呈现先变好再变差最后趋于稳定的有规律的波动性变化.试验得到水泵启动过程中水力旋流器的分离效果在0.200 mm 以上粒径区间最好,其次是在0.100~0.110 mm 粒径区间.

根据DN50圆锥型水力旋流器在不同启动时间条件下各粒径区间的沙粒分级效率变化特点,结合总分离效率规律,建议在工作流量 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时水泵启动时间取30 s.

### 3 结 论

1) 水泵启动过程中, DN50圆锥型水力旋流器总分离效率及分级性能随时间均呈现先变差再变好

最后趋于稳定的规律. 在相同启动时间的同一时刻下, 分级性能随颗粒粒径的增大呈现有规律的波动变化. 对 0.200 mm 及以上粒径区间沙粒的分离效果最好, 其次是 0.100 ~ 0.110 mm 粒径区间的沙粒.

2) 水泵启动时间越短, 水力旋流器对大粒径沙粒分离效果越差, 而启动时间越长, 小粒径沙粒分离效果变差. 为提高水泵启动过程中水力旋流器的分离性能, 建议综合考虑水力旋流器设计流量下的总分离效率、各粒径区间沙粒分级效率和水泵机组装置性能等因素, 采用合适的启动时间.

### 参考文献 (References)

- [1] Wang Zhibin, Chu Liangyin, Chen Wenmei, et al. Experimental investigation of the motion trajectory of solid particles inside the hydrocyclone by a Lagrange method [J]. *Chemical Engineering Journal* 2008, 138(1/2/3): 19.
- [2] 刘永平, 龚俊, 刘晶. 黄河水泥沙分离用水力旋流器的溢流颗粒中位径分析 [J]. *排灌机械* 2007, 25(3): 34-37.  
Liu Yongping, Gong Jun, Liu Jing. Investigation of the particle median diameter of hydrocyclone for separation of sediments from Yellow River's water [J]. *Drainage and Irrigation Machinery* 2007, 25(3): 34-37. (in Chinese)
- [3] 邱元锋, 董文楚, 罗金耀. 微灌用水力旋流器试验研究 [J]. *灌溉排水学报* 2008, 27(5): 18-21.  
Qiu Yuanfeng, Dong Wenchu, Luo Jinyao. Experimental study on the new hydrocyclone separator for micro-irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage* 2008, 27(5): 18-21. (in Chinese)
- [4] 刘永平, 龚俊, 刘晶. 黄河水泥沙分离用水力旋流器分离效率的研究 [J]. *排灌机械* 2006, 24(5): 33-35.  
Liu Yongping, Gong Jun, Liu Jing. Investigation of separation efficiency of hydrocyclone for separation of sediments from Yellow River's water [J]. *Drainage and Irrigation Machinery* 2006, 24(5): 33-35. (in Chinese)
- [5] 辛舟. 基于滴灌的黄河水泥沙分离试验研究 [J]. *排灌机械* 2005, 23(3): 32-34.  
Xin Zhou. Silt of Yellow River separating based on drip irrigation [J]. *Drainage and Irrigation Machinery* 2005, 23(3): 32-34. (in Chinese)
- [6] Saengchan K, Nopharatana A, Songkasiri W. Enhancement of tapioca starch separation with a hydrocyclone: Effects of apex diameter, feed concentration, and pressure drop on tapioca starch separation with a hydrocyclone [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2009, 48(1): 195-202.
- [7] Puprasert C, Hebrard G, Lopez L, et al. Potential of using hydrocyclone and hydrocyclone equipped with grit pot as a pre-treatment in run-off water treatment [J]. *Chemical Engineering and Processing* 2004, 43(1): 67-83.
- [8] 林亚玲, 李树君, 李里特, 等. 水力旋流器分离马铃薯淀粉的试验研究 [J]. *农业机械学报* 2002, 33(4): 55-58.  
Lin Yaling, Li Shujun, Li Lite, et al. Experimental investigation on hydrocyclone for potato starch separation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 2002, 33(4): 55-58. (in Chinese)
- [9] 王军, 刘焕芳, 成玉彪, 等. 国内微灌用过滤器的研究与发展现状综述 [J]. *节水灌溉* 2003(5): 34-35.  
Wang Jun, Liu Huanfang, Cheng Yubiao, et al. General introduction on research and development of domestic micro-irrigation filters [J]. *Water Saving Irrigation* 2003(5): 34-35. (in Chinese)
- [10] 韩丙芳, 田军仓. 微灌用高含沙水处理技术研究综述 [J]. *宁夏农学院学报* 2001, 22(2): 63-69.  
Han Bingfang, Tian Juncang. General introduction on the technology of purifying water for micro-irrigation with high-silt content water [J]. *Journal of Ningxia Agricultural College* 2001, 22(2): 63-69. (in Chinese)
- [11] He Wuquan, Cai Mingke, Wang Yubao, et al. Automatic water supply control system of graded constant pressure by variable frequency speed and its application to pipeline irrigation [C] // *Proceedings of the 2nd WRI Global Congress on Intelligent Systems* 2010: 385-388.
- [12] 褚良银, 陈文梅, 戴光清, 等. 水力旋流器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 62-65.

(责任编辑 陈建华)