

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.03.014

基于 LabVIEW 的人工模拟降雨自动控制系统

周 奇¹,岑国平¹,张 亮²,敦 晓¹,郭明威¹

(1.空军工程大学工程学院,陕西 西安 710038 ;2.中国人民解放军 93936 部队,宁夏 银川 750000)

摘要 介绍一种基于 LabVIEW 语言开发的针对道路水分运移研究的人工模拟降雨自动控制系统。该系统采用闭环控制算法,通过涡轮流量计、电动执行器和 PPC(可编程计算机控制器)来控制各种雨型。试验结果显示 :设计雨强和检测雨强的相对误差在 5% 以下 ;全套系统的重现性、稳定性和降雨空间分布的均匀性在 97% 以上 ;渐变降雨的线性率在 85% 以上。

关键词 人工模拟降雨 ;自动控制 ;LabVIEW ;PCC ;涡轮流量计 ;电动执行器

中图分类号 :TP23 ;S157 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2011)03-0047-04

Auto-control system for artificial rainfall simulation based on LabVIEW//ZHOU Qi¹, CEN Guo-ping¹, ZHANG Liang², DUN Xiao¹, GUO Ming-wei¹(1. School of Engineering, Air Force University of Engineering, Xi 'an 710038, China ;2. Unit 93936, People 's Liberation Army, Yinchuan 750000, China)

Abstract :An auto-control system for artificial rainfall simulation based on LabVIEW to study water migration in road structures was introduced. The closed-loop control algorithm was adopted in the system, and the rain types were controlled by a turbo-flowmeter, electrical regulated valve and programmable computer controller. The test results indicate that the relative deviation between the design and practical rain intensities is below 5% . The fidelity and stability of the whole set of system as well as the uniformity of spatial distribution of the rainfall are all above 97% . The linearity rate of the shadowed rainfall is above 85% .

Key words :artificial rainfall simulation ;auto-control ;LabVIEW ;PCC ;turbo-flowmeter ;electrical regulated valve

降雨是土壤水分的直接来源,也是研究土壤水渗流的最重要因素之一。在道路科学的研究中,雨水入渗是道路破坏的最主要因素^[1]。在自然降雨条件下,虽然能够得到对应降雨条件下道路内部土水渗流情况,但由于自然降雨过程的不可重复性使得道路土水渗流研究不能建立相同的降雨条件而进行必要的重复试验,这是在自然降雨条件下进行道路水分运动过程和机理研究的严重局限。因此,研制人工模拟降雨设备就成为土壤侵蚀科学研究和道路土水渗流研究领域的重要课题。

进入 21 世纪,高性能传感器以及可编程计算机已经应用到人工模拟降雨自动控制系统中^[2-7]。LabVIEW 是自动控制领域领先的工业标准图形化编程工具,所包含的数百个用于测量分析、数学运算和信号处理的功能强大的图形和文本函数可与 LabVIEW 数据采集、仪器控制和数据显示功能无缝集成使用^[8]。

笔者基于 LabVIEW 编程语言,使用闭环控制的算法,利用 PPC(可编程计算机控制器)、涡轮流量计

和电动执行器研制了一套适用于道路结构水分运动的人工模拟降雨自动控制系统。

1 人工模拟降雨自动控制系统的结构框架

1.1 模拟降雨的雨型和雨滴特性

系统的主要功能是模拟降雨的雨型(雨强和历时)和雨滴特性(雨滴滴谱、雨滴速度、雨滴均匀度)等,但以上要素不可能与天然降雨完全一致,所以人工模拟降雨的相似性是土壤侵蚀研究中的一个重要问题。文献[9]中指出 :在降雨模拟试验中,模拟降雨的雨滴降落高度和雨滴速度应取决于相应试验内容的需要。只要将模拟降雨能量与天然降雨能量之间的比例关系,即动能相似关系研究清楚,就可以通过降雨模拟达到一定的土壤侵蚀试验目的。本文所研制的降雨设备主要应用于道路表面和内部水量迁移研究。因此,降雨设备对雨滴特性并无限制,主要对雨型有很高的要求。所要求模拟的雨型如图 1 所示。

图 1 中 T_1, T_2, T_3 分别表示梯形三段底边的时

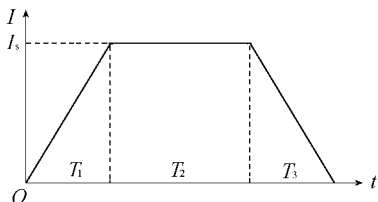


图1 模拟降雨的雨型

段长, I_s 为梯形段的设计雨强。给定 I_s 和 T_1, T_2, T_3 就能得到各种梯形、矩形和三角形雨强。设定最大雨强为 3 mm/min , 最大降雨时间为 3 h , 以满足中国内陆主要城市的设计暴雨要求。雨强与涡轮流量计中的流量转换关系为 $1 \text{ mm/min} = 1.75 \text{ L/s}$ 。 T_1 和 T_3 的雨量变化要有一定的渐进性, 以符合实际降雨情况。

1.2 降雨区条件

降雨区的几何尺寸为 $12 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ 。降雨器安置在室内, 因此降雨时不受外界自然条件的影响。用 6 号注射器针头作为喷嘴, 按边长为 0.25 mm 的正方形布置。降雨装置距离观测面 2.4 m , 4 个角点各安装 1 个电磁阀, 以排除管网中的空气。人工降雨装置如图 2 所示。



图2 人工降雨装置

1.3 人工模拟降雨自动控制系统的组成

人工模拟降雨自动控制系统由循环供水系统、降雨执行器件、自动控制系统组成。

a. 循环供水系统。降雨水源来自容积约为 84 m^3 的地下蓄水池。水流通过水泵房(水泵型号为 8GBA-25 型清水离心泵)流经稳压罐, 稳压后(恒定压力为 0.4 MPa)经过滤器、供水管网至降雨设备。降雨外流的水分将通过地下集水系统流回蓄水池。

b. 降雨执行器件。降雨执行器件包括 1 个电动执行器(DKZ3 型)、1 个涡轮流量计(LWGY 型)和 4 个电磁阀。这些降雨执行器件在控制台发出控制信号时开始工作。涡轮流量计和电动执行器如图 3 所示。

c. 自动控制系统。自动控制系统包括硬件和软件两部分。硬件主要包括研华 610L 型工控机、自行设计的环形电流电路板以及 SFISA-7561 光电隔离计数板。软件主要是基于 LabVIEW 开发的自动控制程序。

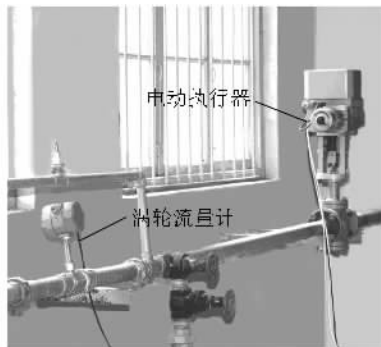


图3 涡轮流量计和电动执行器

2 降雨自动控制原理

2.1 硬件控制原理

硬件设备采用主流传感器及工控技术, 具有普遍自适应功能, 各传感器可任意插拔使用。数据采集、转换、驱动采用小型工控机进行串口通信, 完成其使用功能。人工模拟降雨自动控制系统硬件连接如图 4 所示。

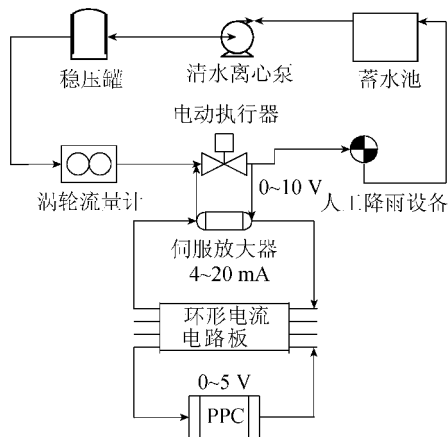


图4 人工模拟降雨自动控制系统硬件连接示意图

2.1.1 流量监测原理

供水流量主要通过涡轮流量计来测量。水的运动将驱动流量计内的叶轮转动, 转动的频率由 1 s 内光电隔离计数板采集到的电压信号的通断测得。流量和频率的转化关系由厂家给出, 即

$$Q = \frac{3.6f}{K} \quad (1)$$

式中: Q 为管道中的流量, m^3/h ; f 为脉冲频率, Hz ; K 为仪表系数, $1/\text{L}$, 纯水取 $73.78/\text{L}$ 。

2.1.2 流量控制原理

流量由电动执行器的开度控制。系统通过自行设计的环形电流电路板, 将电脑输出的 $0 \sim 10 \text{ V}$ 电压转化成 $4 \sim 20 \text{ mA}$ DC 信号。通过对比所需流量和实际流量的大小来控制电动执行器的开度。电动执行器的最大开度为 20 cm 。电动执行器的开度和电压成正比, 灵敏度为 $1 \text{ mm}/0.1 \text{ V}$ 。

2.2 闭环控制算法

雨强的反馈控制是系统的核心。降雨区雨强通过供水管道的流量来反映。设计降雨强度可用式(2)表示：

I_s = \frac{Q_s}{A} \tag{2}

式中：Q_s 为管道中的设计流量；A 为降雨面积，A = 12 m × 9 m = 108 m²。

系统可以模拟 0 ~ 3 mm/min 的雨强，精度为 0.1 mm/min。由式(1)和式(2)可以看出，I_s 和设计频率 f_s 成线性关系：

I_s = \frac{3.6}{AK} f_s \tag{3}

将 A = 108 m², K = 73.78/L 代入式(3)并将雨强单位由 m/h 转化为 mm/min 后得

I_s = 0.00753 f_s \tag{4}

即雨强每变化 0.1 mm/min，频率变化 13 Hz。

根据厂家提供的资料和实验室标定，确认电动执行器的驱动电压与阀门的开度成线性关系，而阀门的开度与雨强成线性关系，雨强与频率成线性关系，则频率和电压成线性关系：

f = \mu U \tag{5}

式中：μ 为标定参数；U 为电压。

PPC 可以调节的电压最小值为 0.1 V，对应电动执行器的开度调节为 1 mm，在压力稳定条件下频率变化 3 ~ 5 Hz。

对各时段的降雨强度进行反馈控制。具体算法如下：

a. T_1 时段。雨强要求在 T_1 时段内由 0 变为 I_s，采用十步逼近法确定 T_1 的调节步长为 ΔT_1 (T_1 = 10ΔT_1) 通过式(4)计算出设计雨强对应的设计频率 f_s (下标 s 表示设计值)和它的调节步长 Δf_s (f_s = 10Δf_s)；电动执行器控制电压的调节步长 ΔU = 0.1 V。当 t = 0 时，U = 0.2 V。开启电动执行器开关后，电动执行器输入电压增加 0.1 V。流量计同时计数，在第 n 个 ΔT_1 里 (n = 1, 2, 3, ..., 10)，将每隔 0.1 s 测得的频率 f_c (下标 c 表示测量值)与 nΔf_s 对比，如果 |f_c - nΔf_s| ≤ 5，那么在 ΔT_1 内电动执行器不再变动。如果 |f_c - nΔf_s| > 5，那么电脑将每隔 0.5 s 给电动执行器增加 0.1 V 电压，直到在 ΔT_1 内 |f_c - nΔf_s| ≤ 5。在每个 ΔT_1 进行这样的反馈控制，就可以形成 T_1 时段内的雨型。

b. T_2 时段。雨强要在 T_2 时段保持均匀雨强。如果 |f_c - Δf_s| ≤ 5，那么电动执行器不再变动 如果 f_c - f_s > 5，那么电脑将每隔 0.5 s 给电动执行器降低

0.1 V 电压，直到 |f_c - f_s| ≤ 5 如果 f_s - f_c > 5，那么电脑将每隔 0.5 s 给电动执行器增加 0.1 V 电压，直到 |f_c - f_s| ≤ 5。

c. T_3 时段。T_3 时段和 T_1 时段类似，只是一个相反的过程。

这里需要说明的是：由于频率测量需要 0.1 s，电动执行器变化需要 0.5 s。因此，保守考虑且为硬件操作方便，控制频率变化的最短时间为 1 s。那么 Δf_s 对应的最短控制时间 t_f = Δf_s / 300。因此，T_1 和 T_3 均要大于 t_min，其中 t_min = 10 t_f = f_s / 300。由式(4)知 f_s = 133 I_s，则 t_min = 0.433 I_s (min)。

2.3 软件组成与流程

软件开发平台为 LabVIEW8.3。软件的主要功能是根据设定的降雨时间和雨强大小来控制降雨情况，并记录、显示实际降雨情况。可模拟均匀强度的降雨和变雨强降雨，见图 1。

软件的整体流程如图 5 所示。各时段模块的流程如图 6 ~ 8 所示。软件的控制界面如图 9 所示。

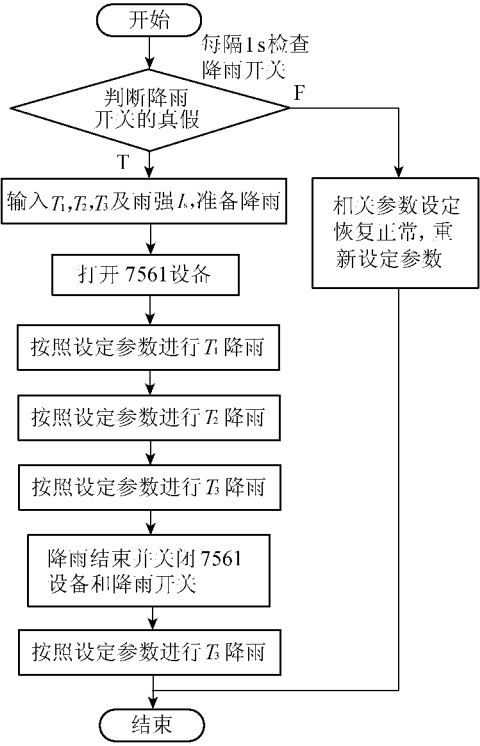


图 5 软件流程

3 结果与讨论

系统自 2009 年建成以来进行了 38 场降雨试验的验证，系统功能达到了设计要求。雨强控制范围为 0 ~ 3 mm/min，精度为 0.1 mm/min，最大降雨时间为 120 h。

实测降雨强度使用非标准法，选用 122.5 cm × 109 cm (长 × 宽) 的长方形铁盘作为汇水区域，进行

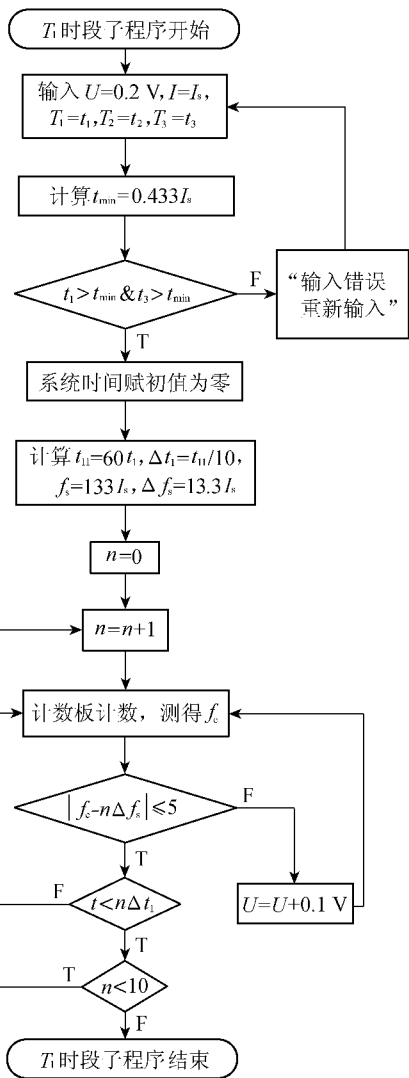


图 6 T_1 时段流程

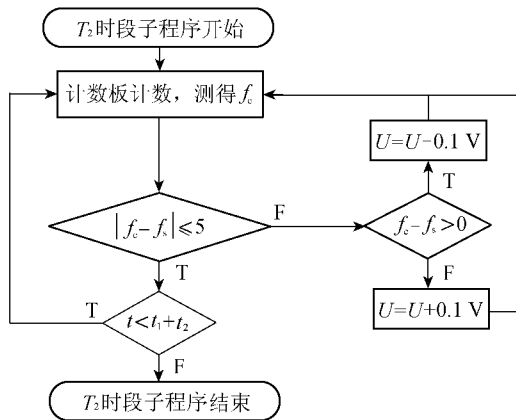


图 7 T_2 时段流程

雨强测试。此后,使用该铁盘在重要控制点上分别对不同降雨场次逐一布点实测,然后按式(6)计算均匀系数。

$$N = \frac{\bar{I}}{\bar{I} + |\Delta \bar{I}|} \quad (6)$$

$$\text{其中} \quad |\Delta \bar{I}| = \frac{\sum_{i=1}^m |I_{ci} - \bar{I}|}{m} \quad (7)$$

式中: N 为均匀系数; $\bar{I}$ 为平均雨强; I_{ci} 为测点 i 实际雨强; m 为测点数。

测试结果显示: T_2 阶段设计雨强与实际雨强相对误差小于 5%,雨强的重现性和空间分布均匀性在 97% 以上, T_1 和 T_3 阶段线性率在 85% 以上,最小降雨时间大于 10 s,重现性在 97% 以上。

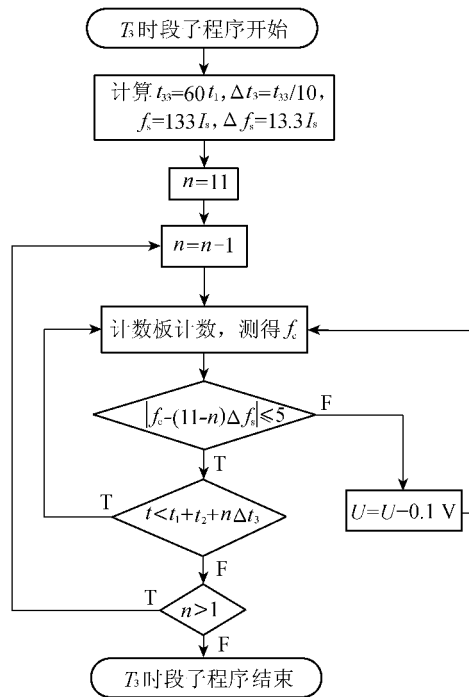


图 8 T_3 时段流程

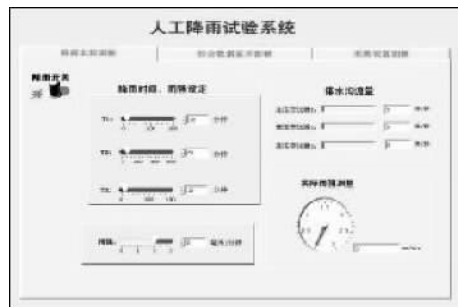


图 9 人工降雨试验系统操作界面

4 结 语

利用人工模拟降雨研究道路覆盖条件下土壤水分运动过程最主要的技术环节是控制降雨强度的变化和降雨的均匀度,从而制造一个可控降雨过程以定量研究降雨和土壤水分变化的关系。本文的降雨控制设备正是基于科研工作的需要,采用自动控制领域先进的编程语言 LabVIEW 和闭环控制算法,研制了一种可以控制降雨强度和均匀度的人工模拟降雨自动控制系统。该系统可以很好地(下转第56页)

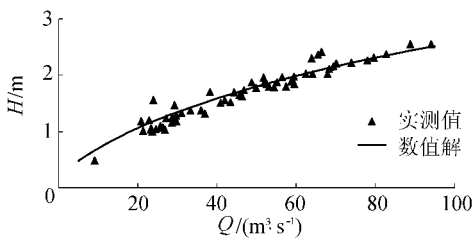


图6 特伦特河测量断面水位-流量关系对比

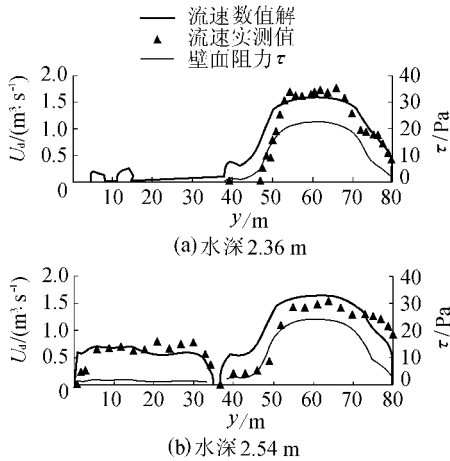


图7 Yoxall 站断面深度平均流速与壁面阻力

不连续的过水断面,其中在滩地处的2个过水断面面积几乎为零,计算更为复杂,如果采用解析解进行求解,难度可想而知。图7表明在 $y = 40 \sim 50$ m之间,由于河槽边壁形状较为复杂,无法精确模拟水流结构,但断面深度平均流速数值解与实测结果变化趋势一致,其他区域两者吻合情况良好。而壁面阻力 τ 在 $y = 50$ m附近急剧增加,在 $y = 70$ m附近快速减小,变化趋势与河床的冲刷情况一致。

3 结 语

实例应用结果表明,无论是水位-流量关系还是断面深度平均流速分布,SKM模型的FVM数值模拟结果与实测数据吻合良好,表明该方法在天然河道的适用性很强,计算结果可靠。该方法拓宽了SKM模型的应用范围,在河道过流能力、水位、洪涝范围等的预测方面具有实际应用价值。虽然目前已有较多较成熟的数值模拟手段,包括LES等精细模型可以用于模拟天然河道流场,但是计算成本随精度及分辨率的增加呈指数型增长,而SKM模型简单,计算运用方便高效。

参考文献:

[1] ZHELEZNYAKOV G V. Interaction of channel and floodplain streams[C]//Proceedings of 14th Conference of International Association for Hydraulic Research. Paris:IAHR,1971:145-148.
[2] 杨克君. 复式河槽水流阻力及泥沙输移特性研究[D].

成都 四川大学,2006.

[3] SHIONO K, KNIGHT D W. Turbulent open-channel flows with variable depth across the section[J]. J of Fluid Mechanics, 1991,222:617-646.
[4] 王树东. 漫滩水流的二维流速分布及水力学计算[J]. 水利学报,1986,17(11):51-59.
[5] LIAO Hua-sheng, KNIGHT D W. Analytic stage-discharge formulas for flow in straight prismatic channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,2007,133(10):1111-1122.
[6] LIAO Hua-sheng, KNIGHT D W. Analytic stage-discharge formulas for flow in straight trapezoidal open channels [J]. Advances in Water Resources,2007,30:2283-2295.
[7] ABRIL J B, KNIGHT D W. Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model [J]. J of Hydraulic Research, IAHR,2004,42(6):616-629.
[8] McGAHEY C. A practical approach to estimating the flow capacity of rivers[D]. Milton Keynes:Open University,2006.
[9] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
[10] 芦妍婷,廖华胜. 明渠流动 S-K 模型参数率定的随机搜索法[J]. 水利学报,2007,38(11):1364-1370.

(收稿日期 2010-09-03 编辑 骆超)

(上接第50页)

模拟梯形降雨,为该领域的科学研究提供良好的设备和技术支持。

参考文献:

[1] 沙庆林. 高速公路沥青路面的水破坏及其防治措施(上)[J]. 国外公路,2000,20(3):1-4.
[2] 郭明航,赵军,王孙安,等. 人工模拟降雨自动控制系统的研制[J]. 农业工程学报,2005,21(7):184-186.
[3] 郑宏伟,李平康. 一种新型人工模拟降雨实验装置的研制[J]. 实验技术与管理,2005,22(4):39-43.
[4] ZHENG Hong-wei, LI Ping-kang. Research and development of a new kind auto-control system for artificial rainfall simulation [J]. Experimental Technique and Management,2005,22(4):39-43.
[5] 王鹏,李平康,杜秀霞. 组态监控系统在人工模拟降雨试验中的设计与应用[J]. 工业控制计算机,2005,18(8):37-38.
[6] 孙振. 基于 PPC 的人工模拟降雨系统设计与实现[D]. 西安:西安理工大学,2006.
[7] 张慧玲. 人工模拟降雨自动控制系统的研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.
[8] 王建群,南金瑞,孙逢春,等. 基于 LabVIEW 的数据采集系统的实现[J]. 计算机工程与应用,2003(21):122-125.
[9] 薛燕妮,徐向舟,王冉冉,等. 人工模拟降雨的能量相似及其实现[J]. 中国水土保持科学,2007,5(6):102-105.

(收稿日期 2010-09-06 编辑 骆超)