

通过优化生产调度实现印染生产节水的方法与实践

周 律, 徐 昆, 邱照景
(清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘 要: 针对目前印染废水排放量大而且一般只进行末端处理的现状,依据已有的优化算法,结合针织印染间歇式生产的特点,进行染缸分区、订单分类等模型的模拟研究;在分析订单拆分与合并的基础上,构建了基于优化调度的间歇式调度模型。将该模型应用于实际生产中,订单调度从染缸分区、订单拆分与合并、订单颜色排序三方面进行了优化,实现了对 60% 的订单进行排产优化,节省了 54.06% 的洗缸用水,可实现年节约用水量为 $(581 \sim 929) \times 10^4 \text{ m}^3$, 年节约生产成本为 813 ~ 1 567 万元。

关键词: 生产调度; 印染; 节水; 遗传算法; 源头控制

中图分类号: X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)11-0110-06

Water Conservation in Textile Dyeing Process by Optimizing Production Schedule

ZHOU Lyu, XU Kun, QIU Zhao-jing

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The dyeing industry discharges large amount of wastewater and can only be treated at the end of the process. To make fundamental improvements, vessels partition and orders classification models were simulated and optimized using an optimization algorithm, based on features of the intermittent production system in the dyeing industry. On the basis of optimal operation, a batch-scheduling model was developed to split and combine orders. In the application of the model, 60% of the orders was re-scheduled and the amount of washing water was reduced by 54.06%, through the optimization of three aspects in the production process: vats partition, order splitting and combining, and order sequencing by color. Moreover, the application of the model could save 5.81 ~ 9.29 million cubic meters of water, and 8.13 ~ 15.67 million yuan in production cost annually.

Key words: production schedule; textile dyeing; water conservation; genetic algorithm; source control

纺织印染行业对中国的经济发展起着重要的作用,是我国重要的民生行业。纺织印染业中棉纺织业占总产值的 78.4%^[1],其中约 55% 是棉针织物^[2],而棉针织印染多采用间歇式染缸进行生产。在印染过程中,排放的废水具有成分复杂多变、水量

大、有机污染物浓度高、色度深、碱性大等特点。

棉针织印染一般采用间歇式染缸生产,染色工艺的浴比(织物质量与印染用水之比)一般在 1:5 ~ 1:8 之间,而印染通常需要 10 ~ 13 道工序。企业为了提高印染质量,生产 1 t 布匹通常需要耗水

约 200 m³,排放的生产废水 COD 浓度大、可生化性差、处理难度较大^[3]。随着我国对印染企业废水排放标准的日益严格,对纺织印染行业的可持续发展提出了挑战,仅从末端对印染废水进行控制已无法实现企业经济效益和环境效益的双重目的。印染生产与一般的化工生产过程类似,受到各种生产原材料的约束,目前水资源逐渐变成一项稀缺的生产材料,因此以产品质量为中心来减少各项资源消耗,从而提高效率显得尤为重要。在印染行业中,除了常用的废水过程控制及末端治理外,污染的源头控制也日益受到重视,是清洁生产发展的一个趋势^[4]。目前印染企业人工调度的目标仅是完成生产任务,而优化调度不仅仅着眼于完成生产任务,更是通过订单的优化调度实现废水排放的源头控制,同时结合废水的循环利用,提升企业清洁生产水平。

由于染缸较多、订单参差不齐及间歇式生产的特点,典型的棉针织印染企业生产过程中的调度问题可归纳为非确定多项式难题(NP-hard),具有一定特性,例如,生产车间中订单之间、染缸之间相互影响,生产车间调度有诸多随机及不确定因素,现有人工调度存在诸多不足等^[5]。如何在现有生产工艺与设备少变或不变的条件下提高水资源利用效率是当前研究的热点^[6~9]。企业调度问题涉及人员、资源、时间分配等,而目前已有的研究主要集中在提高生产效率,没有认识到水资源的稀缺性,未将优化生产调度与节能减排相结合。鉴于此,笔者针对棉针织间歇生产的特点,结合实际生产过程,先对订单进行预处理,即先对订单进行分拆或者合并,再利用遗传算法对订单的生产顺序进行优化,实现了废水的源头控制。

1 优化调度模型

1.1 减排原则与模型假设

1.1.1 减排原则

企业生产的各类消耗可以分为生产消耗和订单切换消耗,都包括一定量的水、能源、助剂、蒸汽和生产设备^[10]。不同类型的产品切换时所需水耗、能耗及其他物质消耗都有所不同。相同颜色订单切换时不需要清洗染缸,同色系由浅到深(顺色)生产时染缸只需要一次简单的水洗,而相同颜色由深到浅(逆色)或不同色系(混色)切换时,需要两次水洗且需要添加一定的助剂。订单被分配到染缸的顺序就确定了生产过程和订单切换过程所需水量,决定了

总用水量。其中,生产过程各阶段排放的废水只与生产工艺和设备相关,而与订单切换无关。因此,本研究仅仅通过对订单的优化调度,在不增加企业额外资金投入的情况下,可以节约水资源并提高水资源利用效率。

1.1.2 条件假设

① 订单的参数和生产数据可根据所建的数据库获得,每个订单都可以在现有染缸上完成;

② 订单的织物颜色分为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫、黑八个色系,每一色系色深分为深、中、浅;

③ 为简化计算,订单切换分为4种情况:同色系同色深切换(非切换)、同色系顺色切换、同色系逆色切换、不同色系(混色)切换,且每种情况订单切换洗缸用水量各不相同;

④ 一个订单实际生产时间约为10~12 h,本模型统一假设为12 h且生产不间断进行;

⑤ 分配订单时需满足订单交货期及不空缸的约束条件。

1.1.3 订单生产顺序矩阵

建立如下订单生产矩阵A,矩阵的行数据表示每个时间段的生产序列,列数据表示每个染缸的生产序列。优化目标是找到最优生产序列 x ,在满足所有订单交货期及不改变原有生产工艺的前提下,使总洗缸耗水量最少,同时根据不同的生产周期来提高排放废水的水质稳定性,从而提高废水回用率。

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 11 & 3 \\ 1 & 8 & 6 \\ 10 & 7 & 12 \\ 4 & 2 & 9 \end{bmatrix} \quad (1)$$

以3台染缸、12个订单为例,假设有订单生产序列{5,11,3,1,8,6,10,7,12,4,2,9},则时间段1生产的订单是5号、11号、3号,时间段2生产的订单是1号、8号、6号,时间段3生产的订单是10号、7号、12号,时间段4生产的订单是4号、2号、9号。染缸1要生产的订单序列是5号、1号、10号、4号,染缸2要生产的订单序列是11号、8号、7号、2号,染缸3要生产的订单序列是3号、6号、12号、9号。本研究的目的是建立模型并从企业订单数据库中读取数据,根据生产数据库的各项限制进行最优订单生产序列 x 的求解。

1.2 目标函数与约束条件

典型的印染企业现行的生产调度方法主要有以

下几个原则:任何一个订单都需要满足交货期,对重要客户及紧急订单尤为如此;在订单资源充足的情况下,染缸需要不间断生产以提高设备利用效率;合并订单是指将不同订单合并成一个新的订单一起生产;拆分订单是指将超过染缸容量的大订单拆分成较小订单的过程;为了减少洗缸用水量,需要增加顺色订单切换,减少逆色和混色订单切换。

1.2.1 目标函数

本研究不涉及对生产工艺的改进与废水的分质回用,只是在所有订单满足交货期的前提下,订单切换时,洗缸水量最小,如式(2)所示:

$$\min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j-1} \text{wash}(o_i, o_{i+1}) \quad (2)$$

其中, m_j 为染缸 j 生产的订单,而 $\sum_{i=1}^{m_j-1} \text{wash}(o_i, o_{i+1})$ 是染缸 j 的总洗缸耗水量; $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j-1} \text{wash}(o_i, o_{i+1})$ 是订单切换时的总用水量。

1.2.2 约束条件

① 交货期约束

交货期是优化调度的前提,只有在满足交货期的前提下,做到节能减排、提高生产效率才有意义。每个订单的完成时间都不能超过交货期,具体如式(3)所示:

$$\text{ceil}(p_i/n) \leq d_i \quad (3)$$

其中, ceil 是向上取整函数,而 $\text{ceil}(p_i/n)$ 表示订单的生产完成时间, p_i 是订单 i 在生产序列 x 中的位置, n 是生产时间段, d_i 是订单 i 的交货期。

② 染缸载布量和织物约束

由于不同织物的染色工艺有所区别,因此当企业接到订单时,将会根据织物的种类进行分类后再进行染色。相同织物的订单可以在同一个染缸进行生产,接下来就是将订单按照染缸载布量的大小进行拆分或者合并。如果订单大小超过了染缸额定载布量,就需要分批生产,即订单拆分。如果订单较小,单独生产会降低机器的效率,而且消耗较多的能源,就需要进行订单合并,即将较多相同的小订单合并生产。

③ 订单切换用水约束

目前企业生产调度主要以提高生产效率、尽快完成订单生产为指导思想,而颜色作为最终的调度约束条件在人工调度中较易被忽略。当订单满足交货期时可以在调度域内随意调整,因此随意性很大,

人工找到最合理的生产序列比较困难。随着国家废水排放标准的提高,水资源的约束严重束缚了印染企业的生产能力,如果能从订单的优化调度着手来减少企业废水的源头排放,将会给企业带来巨大的经济效益。因此,目前印染企业在实际生产中也较为注重优化调度原理的应用。

④ 染缸约束

企业所用的染缸通常分为高温高压染缸和常温染缸。高温高压染缸工作温度高且压力大,因此耗能也大,能用于生产所有织物,诸如含化纤的人棉织物;而常温染缸只能生产一般纯棉类织物。如果调度不当,将常温布类分配到高温缸,就会造成设备及能源浪费。为了让订单进入合适的染缸进行生产,一方面需要根据企业实际情况将染缸分区;另一方面需要根据每个批次质量和工艺要求对订单进行合理分配,即根据工艺要求将订单合理地分配到高温区或者常温区。当订单质量大于染缸的额定载布量时,需要进行订单拆分操作再进行染色。

1.2.3 数据库的建立

本研究运用 MS-Access 2013 构建生产数据库,包括订单编号、客户名称、交货期、织物类型、染料类别、颜色、生产工艺(含生产时间、染缸要求、废水各项指标、水耗、能耗、各种其他物料消耗等)、经济参数等,同时对一些数据采用 Excel 进行存储。当进行优化调度模拟计算时,需要从程序接口调用数据库数据进行计算。

1.3 算法与实现

印染企业订单优化调度问题是典型的多目标优化问题,可以用进化算法进行优化。当前常用的进化算法主要有遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、模拟退火算法等。其中,遗传算法是一类借鉴生物界适者生存、优胜劣汰遗传机制而来的随机搜索方法。本研究将各自订单域订单编码,形成原始染色体,先对其进行交叉、变异,再根据适应度进行评价,即避免出现订单切换的逆色及混色工序,减少洗缸水的用量;同时,保存优良染色体片段,重排劣质染色体片段,最终取得最优调度序列。因此,本研究采用遗传算法作为优化算法,并用 Matlab 2010b 进行编程求解。经验证,当种群个体数 $n \leq 1\,000$ 、最大遗传代数 $m = 1\,000$ 、选择概率 $q_1 = 0.8$ 、交叉概率 $q_2 = 0.8$ 、变异概率 $q_3 = 0.8$ 时,收敛性较好,优化结果较为理想,故作为本模型的设定参数。

1.4 系统运行框架

当企业接到客户订单时,需要先对订单进行分类后再进入调度系统,优化调度流程见图 1。

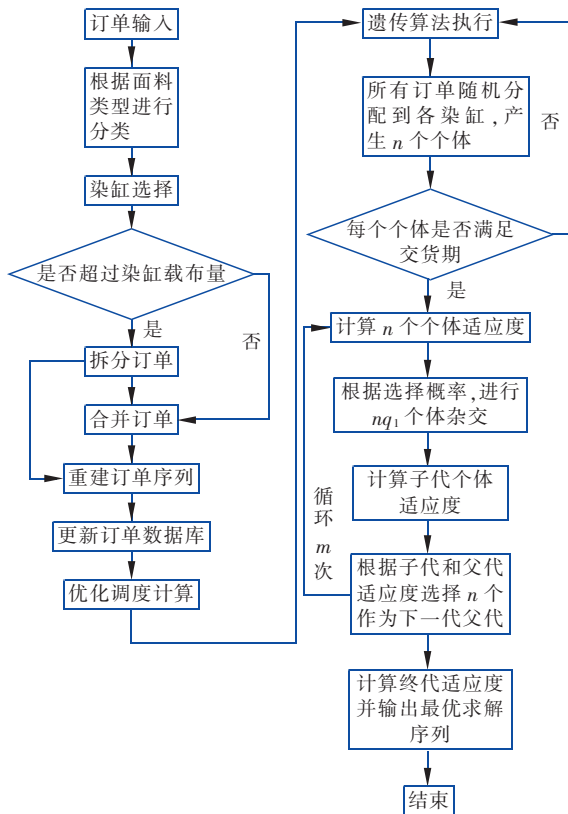


图 1 优化调度流程

Fig. 1 Optimization scheduling flow chart

企业接收订单后,首先对订单进行识别,根据不同织物的生产工艺将订单分配到高温缸或者常温缸生产区。再根据织物颜色和质量的不同进行订单拆分与合并操作。当订单较小且订单的织物类型、颜色及色深完全相同时进行订单合并,即用较大的生产设备将许多小订单一次生产完成,节省生产过程中各种消耗并提高生产效率。当订单超过单个染缸的生产能力时,需要将其拆分为较小的订单进行生产。订单拆分的基本原则是根据订单的大小,将其分配到最为合适的染缸中进行生产,尽量减少可能出现的拆分订单个数,保持生产的连续性。经过订单拆分或者合并的新订单重新进入订单调度系统,同时订单数据库进行更新,为后续的优化计算做准备。经过预处理的订单数据进入基于遗传算法的优化调度系统进行最优生产序列计算,并输出最优订单生产序列。

2 案例分析

2.1 订单预处理

选择无锡市的一家典型的棉针织印染企业为研究对象,实际运行 58 台染缸,年产 30×10^4 t 织物。选取 2015 年 6 月的 280 个订单,总质量为 165 385.1 kg,订单不均匀性较为明显。本研究分别从染缸分区与订单分批、订单的优化调度两方面对模型进行验证,并对该模型调度下订单的节水效果进行分析与评价。

经过计算,全部订单经过拆分或合并后,确定为 190 个批次进行生产,其中,有 90 个订单进行了订单合并操作,占订单总数的 32.1%,订单合并类型有 2 个订单合成 1 个批次、3 个订单合成 1 个批次、4 个订单合成 1 个批次、5 个订单合成 1 个批次四种情况。企业还存在订单拆分的情形,即 1 个订单拆分为 2 个批次、1 个订单拆分为 3 个批次,此案例中,上述两种订单拆分情形各 3 例,订单拆分数占订单总数的 5.4%,是优化调度中需要考虑到情况。

2.2 订单优化调度

经过优化调度的订单如表 1 所示。

表 1 订单优化前后效果对比

Tab. 1 Effect contrast before and after orders optimization scheduling

缸号	同色切换		顺色切换		逆色切换		混色切换		合计	
	前	后	前	后	前	后	前	后	前	后
1	0	0	0	0	0	0	2	1	2	1
2	0	0	0	1	1	0	2	0	3	1
3	0	3	1	2	0	0	6	2	7	7
8	0	0	1	0	1	0	2	0	4	0
11	0	2	3	4	1	0	0	0	4	6
12	4	5	0	1	0	0	1	0	5	6
13	0	4	0	0	0	0	4	1	4	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
G3	0	0	0	5	0	0	2	0	2	5
G2	1	0	2	2	0	0	0	1	3	3
合计	37	74	42	43	9	0	44	15	132	132

注: 前、后分别表示优化调度前后某个染缸的订单数。

由表 1 可知:①相同颜色订单的顺排切换(非切换)情况增加了 37 个,即减少了 37 次需要清洗染缸的情形;同色系不同色深顺色切换增加 1 个,即多出了 1 次需要简单清洗染缸的情形;同色系不同色深逆色切换情况减少了 9 个,不同色系的混色情况减少了 29 个,因此,一共避免了 38 个原本需要加药清洗染缸的过程。相比人工调度,优化调度能进一

步调度的订单数占订单总数的近 60%。②优化调度后,同色系不同色深的逆色排单情况被完全消除。由此可知,通过优化调度,仅仅从减少逆色和混色等不必要的洗缸水过程,就可以在不改变染色生产工艺与流程的情况下减少洗缸水和药剂的消耗。

3 结果与讨论

与企业历史调度结果相比,优化调度方法虽然没有大幅度减少简单洗缸次数,但可以大幅度减少完全洗缸次数。在抽取的订单条件下,订单切换过程中洗缸用水量比企业传统人工调度节约了 70 m³,占洗缸用水总量的 18.4%。此外,如果引入漂

洗水直接回用煮漂工序后,可使得每生产 1 t 布节约 19 m³ 用水量。本研究的目标企业年生产 30 × 10⁴ t 布匹,因此可以节约 570 × 10⁴ m³ 生产用水。

优化调度前、后染缸待生产的布匹质量变化如表 2 所示。可知,经过优化调度后,相同颜色的织物在同一个染缸中染色的的订单增加了 31 053.6 kg,而这些订单可以免去洗缸;同色系不同色深顺色生产订单减少了 12 044.6 kg,而同色系不同色深逆色生产订单减少了 6 046 kg。最为重要的是,经过优化调度,不同色系的混色生产情况减少了 12 963 kg。

表 2 优化调度前后染缸待生产的布匹质量变化

Tab.2 Vats production cloth weight before and after orders optimization scheduling

kg

缸号	相同颜色		同色系浅→深		同色系深→浅		不同色系	
	前	后	前	后	前	后	前	后
1	0	0	0	0	0	0	1 816	908
2	0	0	0	772.8	772.8	0	1 545.6	0
3	0	538.2	0	358.8	0	0	1 076.4	358.8
8	0	0	1 232	0	1 232	0	2 464	0
11	0	717.6	1 076.4	1 435.2	358.8	0	0	0
12	1 268.8	1 586	0	317.3	0	0	317.2	0
13	0	1 268.8	0	0	0	0	1 268.8	317.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
G3	0	0	0	1 856	0	0	742.4	0
G2	270.2	0	540.4	540.4	0	0	0	270.2
合计	48 600.2	79 653.8	35 849.4	23 804.8	6 046	0	23 499	10 536
后-前		31 053.6		-12 044.6		-6 046		-12 963

优化调度的节水效益如表 3 所示。

表 3 优化调度节水效益

Tab.3 Water saving benefits by orders optimization scheduling

订单切换类型	浴比 = 1 : 5				浴比 = 1 : 8			
	调度前洗缸水/m ³	调度后洗缸水/m ³	节水/m ³	节水效率/(m ³ ·t ⁻¹)*	调度前洗缸水/m ³	调度后洗缸水/m ³	节水/m ³	节水效率/(m ³ ·t ⁻¹)*
非切换	0	0	320.13	19.36	0	0	927.67	56.09
顺色切换	179.25	114.02			286.80	182.44		
逆色切换	60.46	0			563.10	252.86		
混色切换	352.49	158.04			947.51	435.30		
注：“*”基于织物质量为 165 385.1 kg 统计的节水效率。								

由表 3 可知,根据生产工艺要求先对待生产订

单进行分类、采用订单的拆分与合并进行预处理,然后再进行优化调度,可以减少不必要的洗缸环节,节约大量水资源。优化调度的简单洗缸次数比人工调度略多,但是完全洗缸次数要少得多,在浴比为 1 : 5 的情况下,洗缸用水量比人工调度时节省了 320.13 m³,比原来洗缸水总量(592.19 m³)减少了 54.06% 的洗缸水;而在浴比为 1 : 8 的情况下,可以节省 927.67 m³,比原来洗缸水总量(1 798.28 m³)减少了 51.59% 的洗缸水。

目前典型棉针织企业生产 1 t 织物需要消耗水量为 150 ~ 200 m³,而通过优化调度,仅通过减少洗缸水就可以让生产 1 t 织物消耗的水量减少 19.36 ~ 56.09 m³。

经济效益方面,企业所处地域的平均水资源费在 1.35 元/m³ 左右,处理成生产用水的平均成本在 0.7 元/m³ 左右,如以年产 30 × 10⁴ t 织物计算,优化调度节约的水资源可以为企业每年节省 1 191 (浴

比=1:5)~3 450万元(浴比=1:8)的生产成本,经济效益显著。

4 结论

根据模拟情况与实际生产调度情况的对比,基于订单拆分与合并的优化调度系统具有较为显著的节水效益与广阔的应用前景。

① 通过基于遗传算法的模型验证了模型的有效性,针对实际案例采用优化的调度方法验证了所建立的优化调度模型能够很好地实现订单的合并与拆分从而分批生产,可以有效地从源头控制废水的排放。

② 优化调度可以实现60%的订单拆分或者合并,增加订单切换中顺色的比例,大幅减少混色订单切换情况的发生,同时减少了逆色订单切换,减少不必要的洗缸用水,实现了洗缸用水减排54.06%的效益。

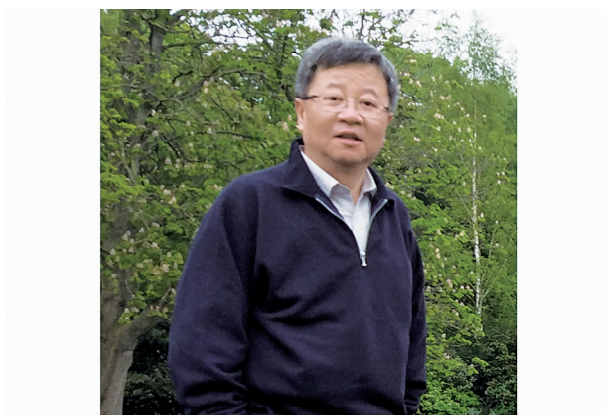
③ 本研究只涉及了对订单切换时清洗染缸用水的节约,不涉及染色各工序排放废水的回用。本研究虽然不涉及对生产过程中排放废水的控制,但可以降低生产过程中排放废水水质的波动,为后续进行废水的清浊分流提供便利,并可与之一起实现印染企业用水效率的提高。

参考文献:

- [1] 奚旦立. 纺织工业节能减排与清洁生产审核[M]. 北京:中国纺织出版社,2008.
- [2] 姜伟立,袁增伟,吴海锁,等. 基于遗传算法的染色生产订单排序与节水研究[J]. 环境污染与防治,2011,33(4):16-19.
- [3] 梁波,徐金球,关杰,等. 生物法处理印染废水的研究进展[J]. 化工环保,2015,35(3):259-266.
- [4] 于金巧,张芸,陈郁,等. 印染集中区水网络优化研究[J]. 环境科学学报,2013,33(12):3260-3266.
- [5] Tan R R, Foo D C Y, Ng D K S, *et al.* An approximate mixed integer linear programming (MILP) model for the

design of water reuse/recycle networks with minimum energy[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2007, 2(6):566-574.

- [6] Hsu H M, Hsiung Y, Chen Y Z, *et al.* A GA methodology for the scheduling of yarn-dyed textile production[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(10):12095-12103.
- [7] Méndez C A, Cerdá J, Grossmann I E, *et al.* State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes[J]. Computers & Chemical Engineering, 2006, 30(6/7):913-946.
- [8] Chen W J. Scheduling with dependent setups and maintenance in a textile company[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(3):867-873.
- [9] Jiang W L, Yuan Z W, Bi J, *et al.* Conserving water by optimizing production schedules in the dyeing industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(16):1696-1702.
- [10] Chan K F, Hui C W. Scheduling batch production using a stepwise approach[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(14):3505-3508.



作者简介:周律(1963-),男,浙江磐安人,博士,副教授,从事水污染控制理论与技术研究。

E-mail:zhoulu@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2016-12-03