

金属熔炼炉前加料一体化系统的开发及应用

刘迎辉¹ 王苏奇¹ 邹文兵² 计效园¹ 房宇³ 周建新¹ 殷亚军¹ 沈旭¹

[1.华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室; 2.上海航天精密机械研究所; 3.新江科技(江苏)有限公司]

摘 要 针对金属熔炼炉前加料人工模式下操作繁琐、实时性差、计算易出错等问题,提出了一种金属熔炼炉前光谱数据集成、配料计算、信息显示、称重指示一体化加料方案。首先基于 XML 中间件数据集成技术实现数据的快速采集,建立了低成本配料计算模型;其次基于 PLC 实现信息显示与称重指示。最后基于华铸 ERP 设计开发了一体化的炉前加料系统并应用于中小型铸造企业。结果表明,该一体化系统操作更便捷,炉料计算耗时降至秒级,可显著提升加料效率。

关键词 金属熔炼;数据集成;炉料配比;一体化系统

中图分类号 TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development and Application of Integrated Feeding System before Metal Smelting Furnace

Liu Yinghui¹, Wang Suqi¹, Zou Wenbing², Ji Xiaoyuan¹, Fang Yu³, Zhou Jianxin¹, Yin Yajun¹, Shen Xu¹

[1.State Key Laboratory of Material Forming and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology; 2.Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute; 3.Xinjiang Technology(Jiangsu) Co., Ltd.]

Abstract: Aiming at the problems of cumbersome operation, poor real-time performance, and error-prone calculations in the manual mode of the metal smelting furnace, an integrated feeding scheme including spectral data integration, batching calculation, information display, and weighing instructions was proposed. Firstly, rapid data collection was achieved based on the XML middleware data integration technology, and a low-cost batching calculation model was established. Secondly, information display and weighing instructions were realized on account of PLC. Finally, an integrated feeding system before the furnace was designed based on the InteCast ERP, which was applied to small and medium-sized enterprises. The results indicate that the integrated system is more convenient to operate, and charging calculation is reduced to the second level, which can significantly improve the feeding efficiency.

Key Words: Metal Smelting, Data Integration, Charge Ratio, Integrated System

铸造行业正在向着数字化、智能化的方向发展,新的技术在提高生产效率、降低生产成本的同时也促进了技术的进一步革新^[1],而炉料加料是铸造的重要环节之一。近年来,设备数据集成技术^[2]、信息质量优化技术

收稿日期:2021-12-09;**修改稿收到日期:**2021-12-26
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1710100);国家自然科学基金资助项目(51905188,52090042,51775205);中国航天科技集团有限公司第八研究院产学研合作基金资助项目(SAST2020-113)
第一作者简介:刘迎辉,男,1997年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail:350601200@qq.com
通信作者:计效园,男,1986年出生,副教授,武汉(430074),E-mail:jixiaoyuan@hust.edu.cn
引用格式:刘迎辉,王苏奇,邹文兵,等. 金属熔炼炉前加料一体化系统的开发及应用[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):818-822.
LIU Y H, WANG S Q, ZOU W B, et al. Development and application of integrated feeding system before metal smelting furnace[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):818-822.

[3] SHOJAEFARD M H, AKBARI M, ASADI P. Multi objective optimization of friction stir welding parameters using fem and neural network[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(11): 2 351-2 356.

[4] 张喆, 张永林, 陈书锦. 基于遗传 BP 神经网络的搅拌摩擦焊温度模型[J]. 热加工工艺, 2020, 49(3): 142-145.

[5] 池浩瀚, 李世海, 刘雪松. 基于遗传算法及神经网络的 6005A-T6 铝合金 FSW 工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2021(7): 118-120.

[6] 潘德林, 黄俊, 陈子博, 等. 基于模糊神经网络的装甲钢复合热源搅拌摩擦焊接头力学性能预测[J]. 焊接技术, 2019, 48(1): 36-39.

[7] 胡为, 常新新, 姬书得, 等. 基于 RBF-GA 的铝/镁异材 FSLW 工艺参数优化[J]. 焊接学报, 2020, 41(6): 54-59.

[8] ZHAO Y, LUO Y, ZHANG H. Dissimilar friction stir lap welding of Al to Mg: Characteristic signal, microstructure and mechanical properties[J]. Coatings, 2021, 11(1): 19-22.

(编辑:刘卫)

等已经成为铸造企业竞争的重要手段,因此铸造工艺的信息化全流程管理十分必要。而在炉前加料工序中,存在着部门间信息交流的差异化风险,所需原料品种相关信息由人工纸质传递,原料的添加量仍然采用人工计算,难以保证炉料计算可靠性,且实时性较差,进而增加炉前加料工序时间,影响企业的生产效率。

炉料信息是炉前配料的核心内容,加料系统需充分利用大量数据资源,减少数据采集的重复,提高数据利用率^[3]。为解决数据管理问题,明廷勇等^[4]采用双系统集成实现了业务对接与数据接口规范,从而规避了数据传输的风险;张爱斌等^[5]设计了设备数据监测等4个系统模块,实现了各类设备的运行状态监测与数据管理。除此之外,在炉料配比方面,AGRAWAL A 等^[6]通过优化高炉负担原始通量计算优化了原材料的使用量;ONIGBAJUMO A 等^[7]提出基于感应炉及炼钢目标合金的电荷计算和炉浴优化过程算法、数值模型和技术经济评价,节省了合金用量及生产成本;MURAV'EVA I G 等^[8]提出选择多组分高炉电荷最佳成分的专家系统的概念基础以及功能和算法结构,解决高炉电荷优化问题;卢晓兵^[9]通过计算机 EXCEL 建立的模型来计算冲天炉炉料的比;陈绍春等^[10]在 EXCEL 中采用矩阵法建立了炉料计算模型;张如先等^[11]开发了一种两部给料控制算法,提高了配料精度;孔一君等^[12]利用优化工具对配料系统进行开发,降低了成本。随着技术的发展,出现了众多改善熔炼配料的新兴技术^[13]。

综上,本课题首先针对数据集成及信息交流差异化风险问题,采用基于 XML 中间件数据集成技术对光谱数据进行采集,对于配料计算依靠人工的问题,建立基于多约束条件下的低成本配料计算模型,实现对配料的合理计算。其次,采用 PLC 以及指示灯的设计完成了补料方案的预警提示与可视化;最后,基于华铸 ERP 设计开发一体化的炉前加料系统。测试表明,该系统对企业提高炉料配比效率、实现生产与管理的智能化转型有着实际工程意义与价值。

1 炉前加料一体化系统方案设计

建立铸造企业金属炉前加料一体化系统首先需要准确快速地对已有检测所得的炉料元素含量等数据进行采集;其次,基于目标钢种元素标准和采集所得的炉料元素含量数据,进行炉料补加方案的计算;最后,将炉料添加到炉中即为炉前加料生产流程结束。

1.1 总体流程设计

炉前加料一体化系统设计见图 1。首先,通过光谱仪测量实时炉料元素含量,通过 SQL Server 完成对炉

料数据的采集与储存,然后通过与数据库内部成品合金材质库中的信息进行对比。如果钢水中各元素含量不在元素含量范围内时,通过 ERP 计算模块调取数据库中的原材料库中信息进行炉料添加量计算,计算结果通过显示屏展示并将数据传输到电子秤中;炉台工作人员向电子秤中添加各炉料的质量,此时电子秤根据采集到的炉料添加信息提示炉料质量是否满足要求。最后,在电子秤中的炉料质量满足要求以后,向炉中添加炉料,加料结束,其运行流程见图 2。

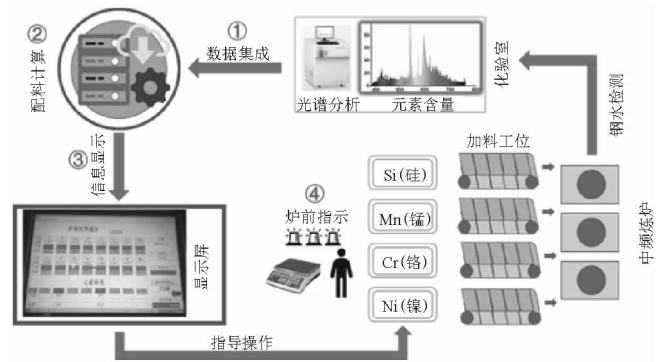


图 1 炉前加料一体化系统方案示意图
Fig.1 Diagram of the integrated feeding system before furnace

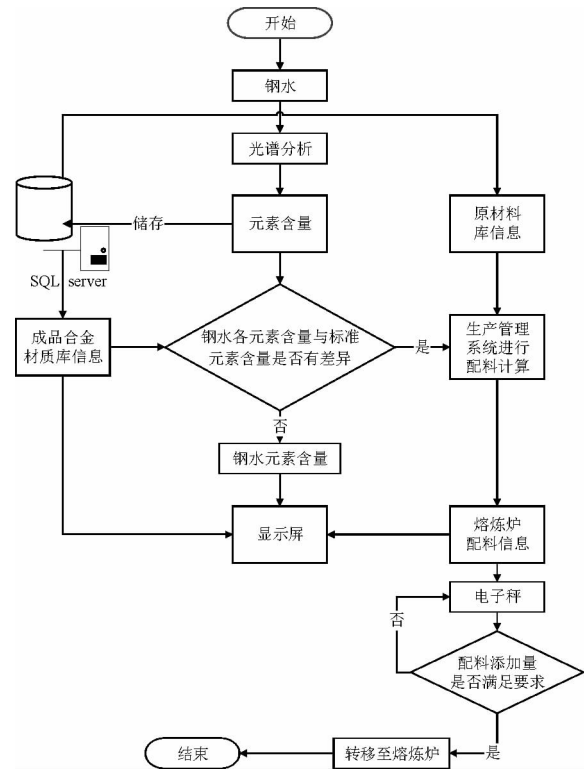


图 2 炉前加料流程图
Fig.2 Flow chart of feeding before furnace

1.2 数据采集

对于多数工业设备,将其接入数据库,通过共享数据以解决设备的信息差异化问题,为各部门的协调运作

提供了有效的保障。

采用以 XML 文件为中间文件的中间件数据采集模式,具备较好的普适性。企业根据所需的 XML 文件的不同节点,可以将 XML 文件中的信息集成到数据库,根据所需建立数据接入器。根据所需要的 XML 文件节点执行 T-SQL 语句,然后在目标表格中执行事先设定好的数据接入器即可完成数据的解析和导入。

光谱仪设备自带数据测量和管理软件,底层数据采用 XML 文件形式分别存储,测试一次炉料便会生成一个 XML 文件。本课题据此 XML 文件编写存储过程中的数据格式调整部分代码,依照中间件模式的思路设计数据接入器。中间件数据采集模式确保了数据的安全性,炉前加料系统对于光谱数据的集成未对生产流程产生影响,同时也未影响其他型号光谱设备原有的数据管理方式,提高了整个数据采集过程的效率。

1.3 配料计算

炉料配比计算目的在于控制炉料元素比例,使得炉料满足生产计划所规定的钢种元素要求,同时能够确保所选炉料添加质量最低。加入熔炉中后,使得某种低于标准下限的元素含量刚好高于标准,确保低成本。炉料配比的核心内容如下:

1.3.1 目标函数

在炉前加料系统的炉料配比计算过程中,通常各种原料所含元素比例不同,且部分原料含有少量其他元素,因此添加单一炉料的同时,整体炉料的质量增加,导致原来的各元素比例下降,即炉料补加对于整体来说是个动态平衡的过程。所以计算的方向为求得所选添加炉料的最低补加量,使得该目标元素满足相应的钢种要求即可。目标函数可表示为:

$$w_i = \frac{m_i + \theta}{M + \theta} \times 100\% \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中, w_i 为炉料中第 i 种补加元素的标准含量; m_i 为第 i 种补加元素的现有质量; M 为炉料总质量; θ 为第 i 种补加元素质量。

1.3.2 约束条件

基于所述问题分析,可知约束条件为炉料元素比例标准约束、炉料添加非负约束、物质平衡约束以及炉料库存约束。

(1) 炉料元素比例标准约束

目标合金的各个元素的含量一般是在一个范围内浮动的,这个范围受到不同的元素和不同品种的合金所影响,所以约束条件是一个不等式,可表示为:

$$a_i \leq w_i \leq b_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中, a_i 、 b_i 分别为第 i 种元素在目标合金元素标准含量的下限与上限。

(2) 实际生产条件约束

由于熔炼过程的持续进行,而且由于烧损率的存在以及不同的生产环境因素等的影响,炉中的各个元素含量会处于动态变化之中,所以目标合金的元素标准含量的上下限一般会依据实际情况考虑这个变化值。企业通过设立内控上下限来使最终的产品符合要求,内控上下限的设立由下式表示:

$$A_i = \frac{a_i}{1 + \varphi_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$B_i = \frac{b_i}{1 + \varphi_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

式中, A_i 、 B_i 分别为第 i 种元素在目标合金元素的内控下限和上限; φ_i 为第 i 种元素在实际生产中的增减量(元素含量增加时为负数,元素含量减少时为正数)。

(3) 炉料添加非负约束

由于炉前加料系统为炉料补加方案的制定,所以炉料配比方案指导实际生产中不可能从炉中减少某种炉料的含量,所以计算出的炉料质量应保持为非负数:

$$m_{oi} \geq 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中, m_{oi} 为第 i 种炉料的补加质量。

(4) 物质平衡约束

炉料中实际各元素含量之和应为 100%, 即:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 100\% \quad (6)$$

(5) 炉料库存约束

为了保证炉前加料的正常运行,提供给工作人员的炉料在库存中的存量应该不小于所计算出的炉料补加方案中的炉料添加质量,可表示为:

$$S_i \geq m_{oi} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

式中, S_i 为仓库中第 i 种补加炉料的总库存质量。

基于上述分析,使用触发器作为底层逻辑代码实现的开始,以向事先准备好的表格中插入光谱源文件或是生产订单的形式使得触发器启动。在触发器中执行之前写好的光谱文件解析导入存储过程,得到数据后,通过与另外建立的目标合金的元素标准含量进行对比。当不满足标准时,工作人员选择仓库中某个品种的原料炉料,然后运行程序计算该炉料的补加质量并填入表中,随后结束整个计算。

1.4 补料指示

国内大部分铸造企业熔炼加料过程的信息传递完全由人工执行,由于铸造现场影响,易使炉料补加方案无法完全正常执行,导致炉石称量结果不准。为规避上述风险,炉前加料系统应该做到正确的将炉料计算结果展现给工作人员,然后在炉料称量的过程中,对于称量设备中的炉料质量是否满足炉料补加方案给予工作人

员明确指示。

本课题基于华铸 ERP 系统的 View 展示窗口,实现车间的炉前加料系统的直接可视化。对于称重设备,企业大都以 PLC 工控端为主,PLC 与本系统所使用的关系型数据库 SQL Server 的数据共享是至关重要的,且由于 PLC 具备功能定制化的能力,提供信号灯以提醒炉料质量是否满足要求也容易达成。采用以 RS485 为主的串口连接,通过以 Modbus 协议为主的通信,将炉前加料系统的炉料数据采集以后下发到称重设备以完成数据的采集,随后通过 PLC 控制的三色指示灯提示工作人员炉料是否满足要求。当秤中的炉料低于要求时指示灯为黄色,高于要求时指示灯为红色,满足要求时指示灯为绿色。

2 熔炼炉前加料一体化系统的实现与应用

某公司熔炼车间共 7 个熔炉,主要是标准炉料质量上限为 10 t 的中频炉,共用一台光谱仪。目前,该企业发现实际炉料数据与目标合金标准含量不同,分析发现该企业采用经验算法和手工计算剩余炉料添加方案,可能存在添加量误差而造成的原料的浪费,增大企业的原料消耗,所以一体化的炉前加料系统成为了解决问题的关键。

炉前加料系统基于华铸 ERP 开发,系统提供了用户交互界面 View。该界面能够完整地显示用户所需信息,同时为了炉前加料的需要,在交互界面也会显示计算后的炉料补加信息。炉前加料模块的主界面见图 3,主要分为 4 个区域,第 1 部分为顶部工具栏,第 2 部分为生产计划完成日期选择,可以通过选择日期查看具体某一天的生产计划安排,第 3 部分为某一天的生产计划任务列表,第 4 部分为炉前化学成分用户交互界面,包含了系统所有主要功能,即炉料光谱数据采集、炉料配比等功能。



图 3 炉前化学成分用户交互主界面

Fig.3 The main interface of user interaction for chemical composition before furnace

选择具体生产计划以后,系统跳转至炉前化学成分显示界面,选择 FTP 向服务器端数据库上传光谱源文件

件,随即跳转至系统资源管理器界面,在相应路径下找到光谱源文件。系统在服务器端数据库成功接收炉料光谱源文件后,炉料光谱源文件成功完成解析并存储在数据库中。

在提示操作成功以后,系统界面显示目标合金各元素标准上下限以及成功采集所得的炉料中各元素的光谱数据,并基于此变换元素补充模块中的颜色以提醒工作人员。交互界面的元素补充模块中,当实际炉料中的某种元素含量低于目标合金的该元素含量下限值或是高于目标合金的该元素的上限值时,元素所在的方框底色会变成红色,同时右下角是否合格方框底色保持为警告色(红色),其他符合目标合金标准含量的方框则维持绿色不变。以此提示工作人员该实际炉料中具体哪些元素含量不符合标准,需要添加炉料以满足目标合金的要求。

数据采集以后,工作人员根据订单需求,合理选择原料炉料并进行炉料补加方案的计算,见图 4。目标合金中的 Si 质量分数为 0.25%,已经低于下限值 0.35%,所以 Si 元素底色变为红色,提示工作人员选择原料炉料,备选方案依照仓库库存显示 60% 硅铁矿和 73% 硅铁矿两个选项,提示工作人员按照需求进行选择。



图 4 选择原料炉料
Fig.4 Raw charge selection

炉前加料系统在实现数据集成与配料计算完以后,为实现数据的可视化,系统基于华铸 ERP 系统的 View 展示窗口,经过工厂的大显示屏,见图 5,实现车间的炉



图 5 熔炼车间炉前加料系统大屏幕
Fig.5 Large screen of feeding system before furnace in the smelting workshop

前加料系统的直接可视化,在一定程度上方便了现场的工作人员,使炉前加料的生产信息变得更可靠。

该公司炉前加料系统于 2020 年 10 月推广使用(见表 1),对比企业原有的炉料配比计算、生产过程以及历史数据分析,该系统实现了企业炉前加料生产计划、光谱数据采集、炉料配比计算功能等信息的集成,生产效率明显提高。

表 1 炉前加料系统应用效果

Tab.1 Application effect of feeding system before furnace		
工序	应用前(人工模式)	应用后(一体化系统模式)
光谱数据存储	本地存储	服务器端数据库存储
光谱数据展示	纸质打印	炉料大屏实时显示
光谱数据历史分析	无	数据库随时查看分析
实际炉料成分预警	人工通知	炉料大屏实时提醒
炉料成分预警时间	约 5 min	约 5 s
炉料补加量	人工经验法计算	计算机精确计算
计算炉料时间	约 2 min	约 2 s
炉料补加	经验补加	称量设备提示
准确添加炉料	存在加错的风险	无风险
炉前补料时间成本	人工成本较高	零成本

3 结 论

(1)结合企业实际状况,针对金属熔炼炉前加料人工模式下操作繁琐、实时性差、计算易出错等问题,提出了一种金属熔炼炉前光谱数据集成、配料计算、信息显示、称重指示等一体化加料方案;设计开发了一体化系统并应用于铸造企业,证实了系统的可行性与实用性。

(2)系统以 XML 中间件数据集成技术实现了光谱数据由本地存储向服务器端数据库存储的转变,使生产信息能够自动集成,降低人工管理成本。多约束条件下的低成本配料计算模型实现了对配料的精准计算,计算耗时估算由原来的分钟级将至秒级。补料方案的设计也改变了依靠人工经验进行的补料操作,指示灯的显示以及炉前加料一体化系统设计降低了加料风险。

(3)炉前加料一体化系统在企业的应用证实了该系统能够有效降低炉前加料的成本,实现炉前加料工艺中参数的可视化管理与数据库存储,可提高企业的历史数据分析能力和生产管理能力。

参 考 文 献

[1] 周建新,殷亚军,计效园,等.熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的构建及应用[J].铸造, 2021, 70(2): 160-174.

[2] JI X Y, YE H, ZHOU J X, et al. Digital management technology and its application to investment casting enterprises [J]. China Foundry, 2016, 13(5): 301-309.

[3] 姜安龙,颜秋余,马兴杰,等.航空钛合金铸件基于信息化的外协全流程管理[J].特种铸造及有色合金, 2018, 38(9): 981-985.

[4] 明廷勇,计效园,周建新,等.铸造生产与财务供应链双系统集成的研究[J].特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 594-597.

[5] 张爱斌,向观兵,田臻,等.铸造设备运行过程监测与数据可视化[J].铸造, 2019, 68(12): 1 402-1 406.

[6] AGRAWAL A, SINGH S R, SINGH M K. Improving the burdening practice by optimization of raw flux calculation in blast furnace burden[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(3): 271-283.

[7] ONIGBAJUMO A, OJO S S. Simulation and techno-economic performance of a novel charge calculation and melt optimization planning model for steel making[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2020, 8(4): 277-300.

[8] MURAV'EVA I G, TOGOBITSKAYA D N, IVANCHANG, et al. Concept development of an expert system for selecting the optimal composition of a multicomponent blast-furnace charge and functional and algorithmic structure[J]. Steel in Translation, 2021, 51(1): 33-38.

[9] 卢晓兵.利用 Microst Excel 进行冲天炉熔炼的配料计算[J].铸造技术, 2003(5): 452-453.

[10] 陈绍春,林新强,朱康正,等.基于 Excel 的矩阵法熔炼配料计算及其应用[J].铸造, 2016, 65(11): 1 075-1 078.

[11] 张如先,王磊,张安年,等.石灰炉配料控制算法[J].洛阳工学院学报, 2000(2): 70-72.

[12] 孔一君,赵千惠,于志斌.优化工具在合金熔炼配料中的应用[J].设备管理与维修, 2021(15): 117-118.

[13] 曹玉亭,贺亮,邵岩海,等.TPS 防错技术在中频炉熔炼配料计算中的应用[J].现代铸铁, 2019, 39(6): 53-55.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

《特种铸造及有色合金》杂志社
地址:武汉市江岸区江大路 26 号
邮编:430019
电话:027-85358206,85486024
传真:027-85358127
投稿网址:www.special-cast.com
邮箱:tzzz@special-cast.com

