

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209737

一次性泵用输液器对输液精度的影响研究*

王洋¹ 郭淼¹ 杨宜婧² 高晶敏¹

(1.北京信息科技大学自动化学院 北京 100192; 2.航天员科研训练中心 北京 100094)

摘要: 医用输液泵搭配一次性泵用输液器进行输液时,环境温度和输液时间、速度引起的输液精度变化会影响治疗效果。为此本文研究了不同温度和中高流速条件下,随着输液时间增加,使用泵用输液器对输液精度的影响,建立了输液时间、输液温度、输液流速对输液精度的三对数总模型和对数+双曲线总模型。在温度为10℃、20℃、30℃条件下,均进行了流速为100、200、500、1 000 ml/h的输液实验,分别探究了时间、温度、流速对输液精度的单变量影响。最后进行了单变量模型的预测分析、总模型的参数辨识以及预测分析。在本实验条件下,单变量模型的均方根误差均小于0.01,判定系数均大于0.96,时间和流速的单变量模型的预测值与真实值的相对误差均小于10%,前者误差更是基本均小于1%;总模型的均方根误差小于0.01,判定系数大于0.93,总模型预测值与真实值的相对误差小于10%,验证了所建模型的准确性和有效性,为标定时间、温度、流速引起的输液误差提供了理论依据。

关键词: 泵用输液器;输液精度;单变量模型;总模型;预测分析;参数辨识

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Research on the influence of disposable infusion set for pump on infusion accuracy

Wang Yang¹ Guo Miao¹ Yang Yijing² Gao Jingmin¹

(1. School of Automation, Beijing University of Information Technology, Beijing 100192, China;

2. Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: When a medical infusion pump is used with a disposable pump infusion set for infusion, the changes in infusion accuracy caused by ambient temperature, infusion time and speed will affect the treatment effect. For this reason, this paper studies the effect of using a pump infusion set on the infusion accuracy with the increase of infusion time under the conditions of different temperatures and medium and high flow rates, a triple logarithmic total model and a logarithmic+hyperbolic total model of infusion time, infusion temperature, and infusion flow rate on infusion accuracy are established. Infusion experiments with flow rates of 100, 200, 500 and 1 000 ml/h are carried out at temperatures of 10℃, 20℃ and 30℃, respectively. The univariate effects of time, temperature and flow rate on the infusion accuracy are explored respectively. Finally, the prediction analysis of the univariate model, the parameter identification of the total model and the prediction analysis are carried out. Under the experimental conditions, the root mean square errors of the univariate models are all less than 0.01, and the coefficients of determination are all greater than 0.96. The relative errors between the predicted values of the time and flow velocity models and the actual values are all less than 10%, and the error of the former is even greater, basically less than 1%, the root mean square error of the total model is less than 0.01, the coefficient of determination is greater than 0.93, and the relative error between the predicted value of the total model and the actual value is less than 10%, which verifies the accuracy and effectiveness of the built model. It provides a theoretical basis for calibrating the infusion errors caused by time, temperature and flow rate.

Keywords: pump infusion set; infusion accuracy; univariate model; total model; prediction analysis; parameter identification

0 引言

当前,输液泵搭配一次性泵用输液器给患者输液在临

床医疗中普遍可见,可以显著提升输液的质量^[1]。尤其是需要给重症患者注入急救药物、麻醉药物等药物时^[2],泵用输液器和输液泵的配套组合起了至关重要的作用。因为输

收稿日期:2022-04-25

*基金项目:北京信息科技大学促进高校分类发展重点研究培育项目(2121YJPY217)资助

液泵能精准控制输液流速与时间^[3],而一次性泵用输液器则搭配输液泵用于精确定量给药,满足了医护人员对液滴速度要求高的需求^[4]。泵用输液器作为一次性医用耗材,输液精度关系着输液安全。针对患者自身情况以及病情不同,输液方式也会有所差异,特殊患者需要对滴速进行严格的控制^[5],在给烧伤病人或危重病患者输液时,医生需要大幅提高输液泵设定流速,及时满足病人身体需求。此类输液泵通常被称作急救输液泵。创伤、烧伤休克早期救治需要进行液体复苏,进而防止休克发生。液体复苏过程中需要对患者进行输液及输血,而且输注时间比普通患者长,输注速度变化范围也比较大,输注速度一般在 100~400 mL/h,平均速度为 200 mL/h,危重情况下输注速度会更高。液体复苏对补液精度要求较高,补液不及时或者补液量不恰当均会造成继发病发病率和死亡率的提高。或是在非常温条件(比如低温、高温)下输液,环境温度的差异也会给输液任务带来严峻的挑战。如果医务人员不能掌握和把控输液精度的变化规律,则可能引发输液安全问题,存在输液风险。

近年来,医疗领域越来越重视和关注输液安全^[6-7],开展输液质量控制的研究^[8-10]。输液质量不仅仅和输液泵本身的机械参数有关,还与其搭配的输液器^[11]、输液流速、输液环境的温度变化有关。李静^[12]研究发现指出,输液流速的大小会影响输液精度。输液过程中使用输液加温器,说明输液温度关乎输液精度的变化^[13]。近年来大量研究证实,温度变化会给仪器仪表带来非线性误差^[14],无论是工业检测领域还是医疗领域,温度都是不容忽视的因素^[15]。陆佳等人研究指出,建议临床每隔 6~8 h 更换一次夹管位置,这也说明输液时间影响输液精度的变化^[16]。但是,这些分析和方法都缺乏科学的理论依据和实验支撑,而且在复杂背景下给烧伤病人或危重病患者输液时,要同时满足温度、流速和时间的需求,三个输液变量共同对输液精度的影响还有待进一步探究。

本文研究一次性泵用输液器对输液精度的影响,通过在温度为 10℃、20℃、30℃ 条件下,均进行流速为 100、200、500、1 000 ml/h 的中高流速输液实验,探究输液规律以及输液精度的变化规律,建立了单变量和全变量总模型,为标定一次性泵用输液器由时间、温度、流速引起的输液误差提供了模型依据。

1 模型构建

1.1 单变量模型建立

本实验涉及 3 个变量,分别建立时间、温度、流速与输液精度之间的单变量模型。通过对获取的实验数据进行单变量数据分析以及散点图绘制,能发现实验数据整体的变化趋势是非线性的,数据变化的规律都是先快速变化再趋于平缓变化,且都是单调变化的,于是利用 Origin 软件对实验数据进行拟合曲线、建模,再借助判定系数 R^2 来衡量

数据的拟合度,最后选择用对数模型作为时间、温度分别与输液精度之间的数学模型,如式(1)、(2)所示。由于受温度影响,通过观察数据散点趋势,比较选取模型的判定系数 R^2 和均方根误差的大小,对温度采取分开建模,对不同温度用对数模型和双曲线模型作为流速与输液精度之间的数学模型,如式(3)、(4)所示。

$$y = c \ln t + m \quad (1)$$

$$y = b \ln T + m \quad (2)$$

温度为 10℃~20℃:

$$y = a \ln v + m \quad (3)$$

温度为 30℃:

$$y = \frac{a}{v} + m \quad (4)$$

式中: t 、 v 、 T 分别代表时间、流速、温度, y 代表输液精度, c 、 a 、 b 为系数, m 为常数。

1.2 总模型建立

由 1.1 节可知,单变量模型符合对数关系或双曲线关系。薛燕彬等^[17]提出了一种多元非线性双对数输液模型,于是本文构建时间、流速、温度和输液精度之间的总模型,采用的是三对数模型和对数+双曲线模型。温度为 10℃~20℃ 和温度为 30℃ 时的总模型分别如式(5)、(6)所示。

$$y = a \ln v + b \ln T + c \ln t + m \quad (5)$$

$$y = c \ln t + \frac{a}{v} + m \quad (6)$$

2 实验系统及数据获取

2.1 实验系统建立

1) 时间-输液精度实验系统

为了获取更加真实准确的数据,探究时间对输液精度的影响,即时间作为变量,必须固定其它变量,在某一特定温度和流速下进行实验,保证时间-输液精度实验系统的严谨性。在时间-输液精度实验中,温箱(GDJS 系列高低温湿热试验箱)提供恒定的 10℃、20℃、30℃ 的温度环境,水箱里灌满蒸馏水模拟提供药液,输液泵(北京来普 LIFEPUM SA5 系列输液泵)挤压一次性泵用输液器(山东新华安德医疗用品有限公司),在温度和输液流速都固定的情况下,随着输液时间的增加,分析天平(梅特勒 MS-TS 型分析天平,量程 3 200 g、精度 0.01 g)称量输出液体的重量,探究输液时间对输液精度的影响。电脑称量软件 easy-connect 实时记录天平的数据。

2) 温度-输液精度实验系统

在温度-输液精度实验中,输液泵挤压一次性泵用输液器,分析天平称量输出液体的重量,在输液时间和流速都固定的情况下,探究 10℃、20℃、30℃ 分别对当前时间的输液精度的影响。电脑称量软件 easy-connect 实时记录天平的数据。

3) 流速-输液精度实验系统

在流速-输液精度实验中,在固定温度和输液时间的情况下,输液泵以不同流速(100、200、500、1 000 ml/h)挤压一次性泵用输液器,探究 4 种不同流速对输液精度的影响,分析天平称量输出液体的重量,电脑称量软件 easy-connect 实时记录天平的数据。实验系统示意图和实物图分别如图 1、2 所示。

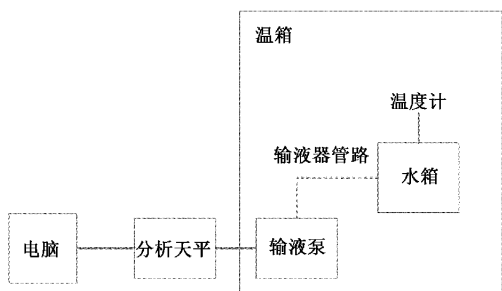


图 1 实验系统示意图

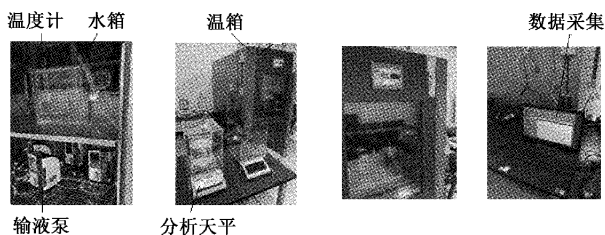


图 2 实验系统实物

2.2 实验方法

1) 实验前准备工作

输液泵对输液器进行标定。实验前分析天平通电预热,天平水平调平,且进行校准。量杯内装适量水,铺满一层石蜡油,确保管路出液口被浸没,然后静置在天平上。水箱加满水。电脑打开软件准备记录数据,5 s 记录一次。输液器去掉滴壶及其以上部分。将电子温度计插入水箱,用于实时显示水箱内液体温度,保证液体温度和环境温度的一致性。

2) 时间-输液精度实验方法

使用北京来普 LIFEPUM SA5 系列输液泵分别设定流速为 100、200、500、1 000 ml/h 来控制输液

器输液,输液时间为 4 h,部分实验时间不足 4 h。分析天平(可设定采样时间)实时测量输出液体重量变化,并且电脑实时记录称量数据。此次实验分别在温度为 10 ℃、20 ℃、30 ℃ 的条件下进行。

3) 实验计算公式

时间-流速误差公式:

$$\Delta e = \frac{\frac{M_{sum}}{T_{sum}} - V_{set}}{V_{set}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: M_{sum} 表示从输液开始到当前时间输出液体的重量, T_{sum} 表示从输液开始到当前时间的总时间, M_{sum}/T_{sum} 表示当前时间实际测量计算出的流速, V_{set} 表示在输液泵上设定的流速, Δe 表示流速误差。

4) 实验步骤

实验前准备工作做好以后,把水箱、输液泵放入温箱,水箱放在位置高处,与天平形成高度差,模拟重力输液的环境,天平连接电脑。将输液器与管路相连,当全部管路连接完成后,设置输液泵参数,此时不装卡输液器,以减少对输液器管路的挤压。设置温箱温度,启动温箱。待水温和温箱显示温度达到设置的温度,快排空气,当管路充满满足目标条件温度的液体后,关闭输液器止液夹。打开温箱门,装卡输液器,然后打开止液夹。启动输液泵,实验开始。输液完成后,停止输液泵,从电脑软件中导出数据至 excel 表格。实验流程如图 3 所示。

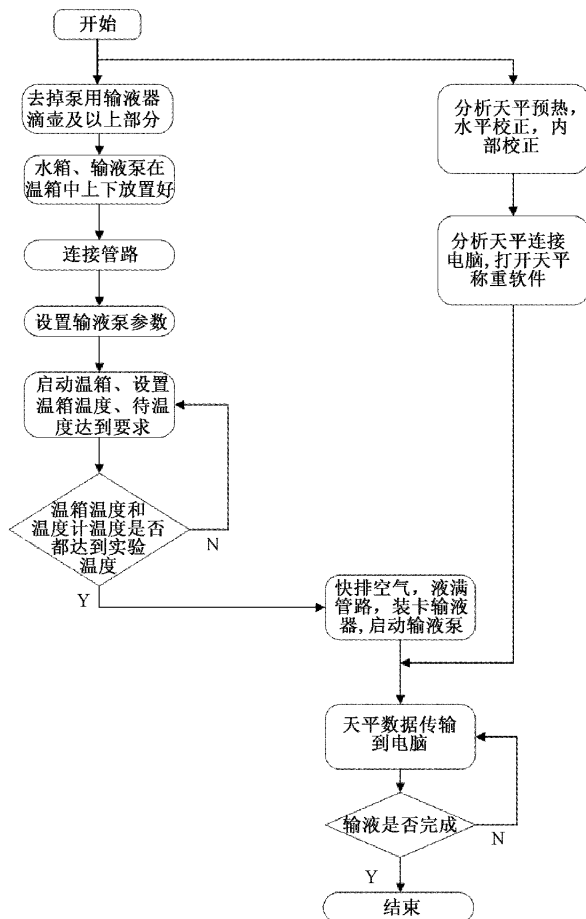


图 3 流速精度实验流程

2.3 实验数据

通过进行时间-输液精度实验、温度-输液精度实验、流速-输液精度实验 3 组不同实验,得到了时间-实际流速数据,数据散点连线图如图 4~7 所示,以及包含时间、温度、流速和流速误差的数据,如图 8~11 所示。

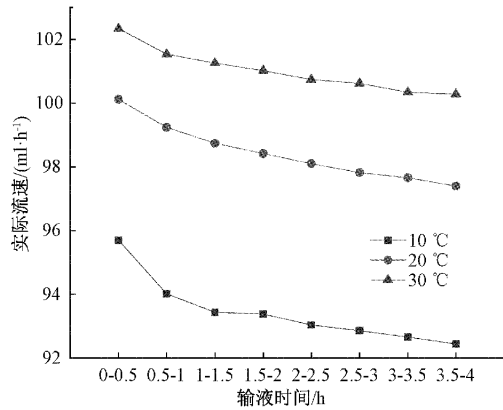


图 4 100 ml/h 在不同温度下的输液实际流速数据

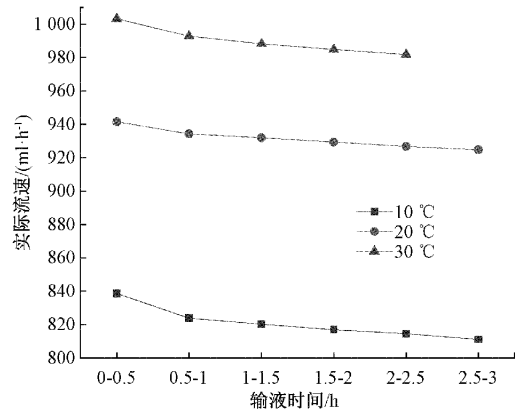


图 7 1000 ml/h 在不同温度下的输液实际流速数据

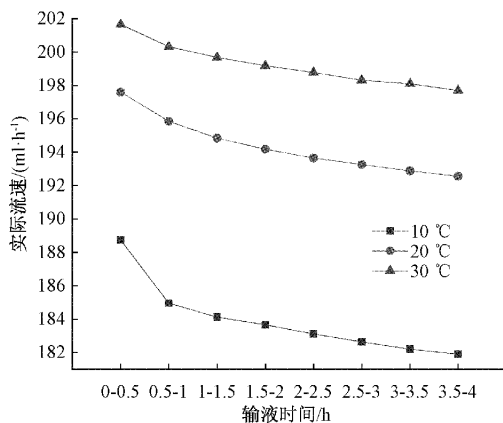


图 5 200 ml/h 在不同温度下的输液实际流速数据

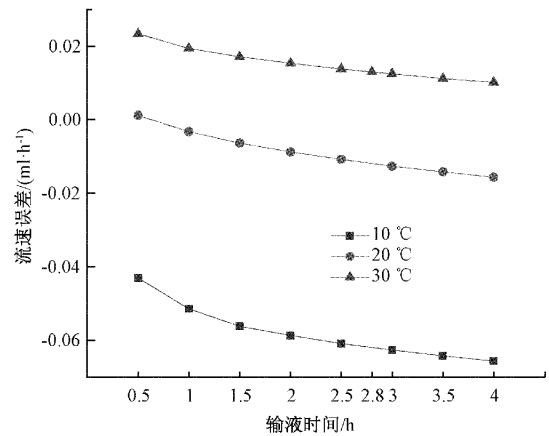


图 8 100 ml/h 在不同温度下的输液流速误差数据

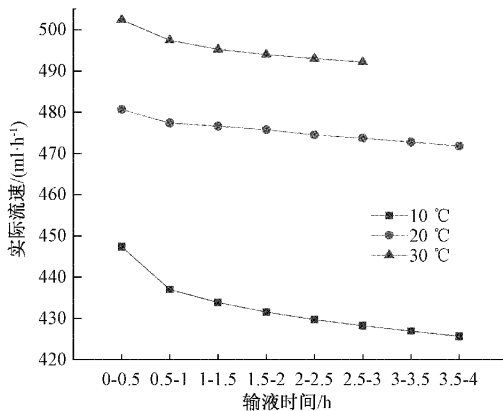


图 6 500 ml/h 在不同温度下的输液实际流速数据

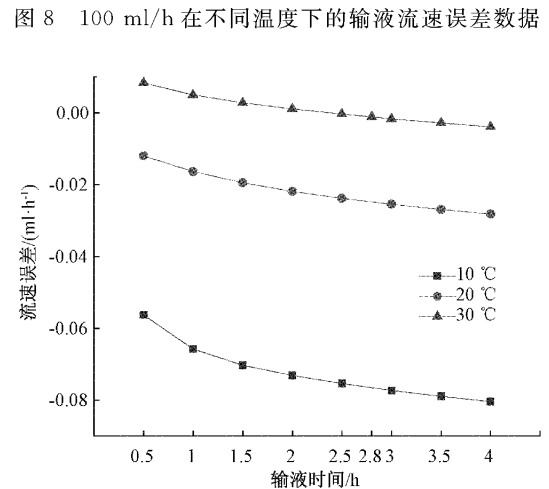


图 9 200 ml/h 在不同温度下的输液流速误差数据

3 实验数据分析

为了探究输液时间、输液温度、输液流速分别对输液精度的影响,即考虑单变量对输液精度的影响,结合所建单变量模型进行数据分析,可以通过分析输液过程中输液流速的变化来帮助分析输液时间、输液温度、输液流速对输液精度的影响。将实验数据进行拟合曲线,建模,分别从时间、温度、流速对输液精度影响的 3 个角度进行数据分析。

3.1 实际输液流速数据分析

为了研究输液流速随时间的变化,选择在特定输液流速和温度下,分析实际输液流速随时间的变化规律。通过对图 4~7 进行横向直观分析,可以得出以下结论:随着输液时间的增加,实际输液流速减小。

为了研究输液流速随温度的变化,选择在特定输液流速和时间下,分析实际输液流速随温度的变化规律。通过

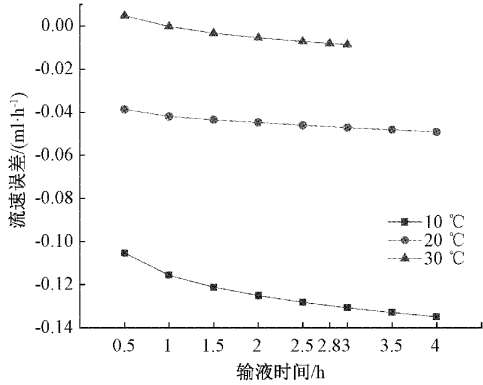


图 10 500 ml/h 在不同温度下的输液流速误差数据

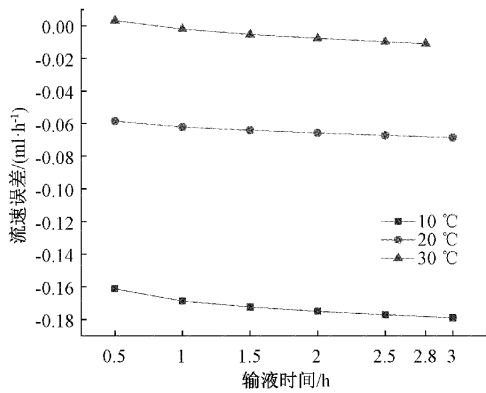


图 11 1 000 ml/h 在不同温度下的输液流速误差数据

对图 4~7 进行纵向直观分析,可以得出以下结论:随着温度的升高,实际输液流速增大。

3.2 输液时间对输液精度影响分析

对图 4~11 输液流速和输液流速误差数据进行直观分析:1)随着输液时间的增加,实际输液流速不断减小,在输液开始后的前 1~2 h,是实际输液流速的快速衰减期,输液流速误差变化明显。

2)当输液泵设定的流速越大,在相同的时间内,实际输液流速衰减得越快,设定的流速越小,实际输液流速衰减得越慢。

3)使用一次性泵用输液器在 10 °C 条件下以 100 ml/h 流速输液 2.5 h 的流速误差已经大于 6%,以 200 ml/h 流速输液 4 h 的流速误差已经大于 8%,均已超出相关规范要求^[18],所以要尽量避免在 10 °C 甚至更低温度条件下进行流速大于 100 ml/h 的中高速输液操作。在 20 °C 以下进行中高速输液时,实际输液流速小于输液泵设定流速,应尽量选择在 20 °C 以上或温度较高的环境中进行中高速输液,这样可以控制输液流速误差在较长时间内保持在正常范围内,保证输液安全进行。

为研究输液时间对输液精度的影响,结合 1.1 节式(1)所建对数模型,对实验数据进行回归分析。分别将 100、200、500、1 000 ml/h 实验的输液时间作为自变量,选择对应时间点 t 为 0.5、1、2、2.5、3、4 h(也可选择其它时间,不足 4 h 的取最大时间且 2.5 h 作为测试样本)的输液流速误差作为因变量,并进行对数回归分析。分析结果如表 1。

表 1 输液时间对输液精度影响回归分析结果表

流速/(ml·h ⁻¹)	温度/°C	m	c	R^2	RMSE
100	10	-0.050 90	-0.010 79	0.998 26	0.000 3
	20	-0.003 74	-0.008 02	0.991 10	0.000 5
	30	0.019 32	-0.006 23	0.995 57	0.000 2
200	10	-0.064 89	-0.011 45	0.996 40	0.000 5
	20	-0.016 89	-0.007 80	0.994 44	0.000 4
	30	0.004 67	-0.005 79	0.992 56	0.000 4
500	10	-0.115 28	-0.014 16	0.999 75	0.000 2
	20	-0.041 85	-0.004 88	0.990 70	0.000 3
	30	-0.000 32	-0.007 47	0.999 61	0.000 1
1 000	10	-0.168 32	-0.009 81	0.998 74	0.000 2
	20	-0.062 20	-0.005 51	0.996 38	0.000 2
	30	-0.002 24	-0.008 16	0.997 87	0.000 3

其中 100 ml/h 流速实验,输液时间与输液精度单变量对数拟合曲线如图 12 所示,(曲线为拟合曲线,点为真实值)。

表 1 中,各流速在各温度下,输液时间与流速误差曲线都符合对数模型,且 R^2 均大于 0.99,拟合优度极高,均方根误差 RMSE 非常小且均小于 0.000 5,因此,1.1 节式(1)所建对数模型适用于输液时间对输液精度的影响。

3.3 输液温度对输液精度影响分析

为研究输液温度对输液精度的影响,结合 1.1 节式(2)所建对数模型,对实验数据进行回归分析。

分别将 10 °C、20 °C、30 °C 的输液温度作为自变量,选择流速 100、200、500、1 000 ml/h 分别在对应相同时间 t 为 1、2、3、4 h(不足 4 h 的取最大时间)的输液流速误差作为因变量,并进行对数回归分析。分析结果如表 2。

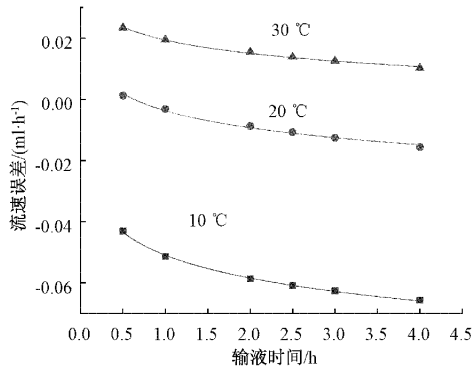


图 12 输液时间与输液流速误差拟合曲线图

其中 100 ml/h, 输液温度与输液精度单变量对数拟合曲线如图 13 所示。

表 2 中, 各流速在各时间下, 输液温度与流速误差曲线都符合对数模型, 且 R^2 均大于 0.99, 拟合优度极高, 均方根误差 RMSE 均小于 0.003, 因此, 1.1 节式 (2) 所建对数模型适用于输液温度对输液精度的影响。

3.4 输液流速对输液精度影响分析

为研究输液流速对输液精度的影响, 结合 1.1 节式 (3) 和式 (4) 所建对数模型和双曲线模型, 对实验数据进行回归分析。

分别将 100、200、1 000 ml/h 实验的输液流速作为自

表 2 输液温度对输液精度影响对数回归分析结果表

流速/(ml·h ⁻¹)	时间/h	<i>m</i>	<i>b</i>	R^2	RMSE
100	1	-0.200 20	0.064 99	0.996 89	0.001 6
	2	-0.214 23	0.067 90	0.997 62	0.001 5
	3	-0.220 38	0.068 79	0.998 50	0.001 2
	4	-0.224 59	0.069 29	0.998 98	0.001 0
200	1	-0.214 49	0.065 10	0.994 31	0.002 2
	2	-0.229 19	0.068 23	0.995 56	0.002 1
	3	-0.236 20	0.069 44	0.996 31	0.001 9
	4	-0.241 21	0.070 24	0.996 72	0.001 8
500	1	-0.357 65	0.105 21	0.999 94	0.000 4
	2	-0.376 37	0.109 63	0.997 96	0.002 3
	3	-0.387 56	0.112 21	0.996 41	0.003 0
1 000	1	-0.518 41	0.152 01	0.999 91	0.000 6
	2	-0.526 11	0.152 88	0.999 36	0.001 8
	2.8	-0.529 50	0.153 04	0.999 01	0.001 2

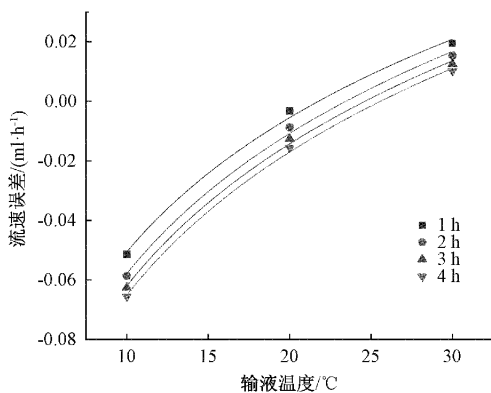


图 13 输液温度与输液流速误差拟合曲线图

变量, 选择相同温度、相同时间下的输液流速误差作为因变量, 对 10 °C 和 20 °C 温度下的数据进行对数回归分析。分析结果如表 3。

其中, 在 20 °C 条件下, 输液流速与输液精度单变量对数拟合曲线如图 14 所示。

表 3 10 °C 和 20 °C 输液流速对输液精度影响回归分析结果表

温度	时间/h	<i>m</i>	<i>a</i>	R^2	RMSE
10 °C	1	0.203 09	-0.053 25	0.966 01	0.009 6
	2	0.193 49	-0.052 78	0.966 82	0.009 4
	3	0.189 51	-0.052 79	0.967 39	0.009 4
20 °C	1	0.119 00	-0.026 10	0.993 03	0.002 1
	2	0.109 02	-0.025 18	0.994 43	0.001 8
	3	0.102 99	-0.024 72	0.994 28	0.001 8

当温度为 30 °C 时, 通过对实验数据进行离散点绘制, 分别进行双曲线回归分析和对数回归分析, 如表 4 和 5。

表 4 30 °C 输液流速对输液精度影响双曲线回归分析结果表

时间/h	<i>m</i>	<i>a</i>	R^2	RMSE
1	-0.004 95	2.393 44	0.981 26	0.001 2
2	-0.010 83	2.578 57	0.994 36	0.000 7
2.8	-0.013 89	2.664 78	0.998 40	0.000 4

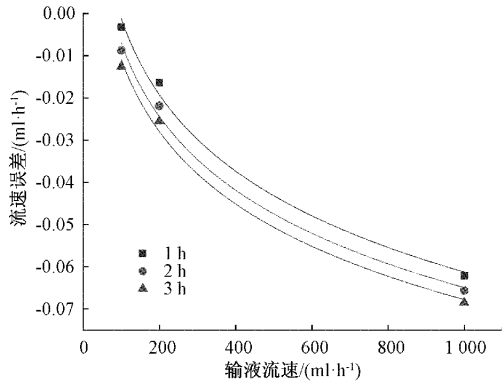


图 14 输液流速与输液流速误差对数拟合曲线图

表 5 30 °C 输液流速对输液精度影响对数回归分析结果表

时间/h	<i>m</i>	<i>a</i>	<i>R</i> ²	RMSE
1	0.054 51	-0.008 39	0.828 31	0.003 7
2	0.054 59	-0.009 22	0.872 56	0.003 4
2.8	0.054 29	-0.009 63	0.895 04	0.003 2

通过对比发现,在各输液时间下,双曲线拟合时的 *R*² 都比对数拟合时的大,均方差远小于对数模型的均方差,说明双曲线拟合优度更高,模型质量更好,准确性更高。所以当温度为 30 °C 时,双曲线模型更适用于输液流速对输液精度的影响。在 30 °C 条件下,输液流速与输液精度单变量双曲线拟合曲线如图 15 所示。

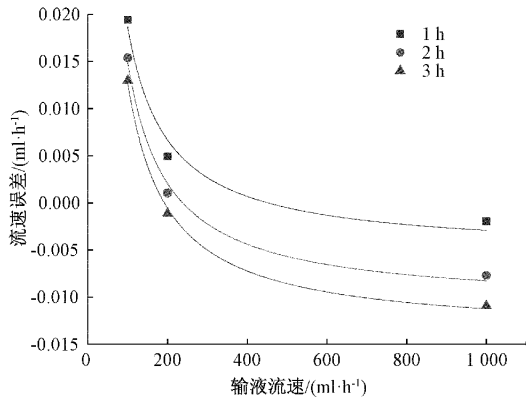


图 15 30 °C 输液流速与输液流速误差双曲线拟合曲线图

表 3 中,在 10 °C 和 20 °C 温度下,各时间下的输液流速与流速误差曲线都符合对数模型,且 *R*² 均大于 0.96,拟合优度高,均方根误差均小于 0.01,模型准确性高,因此,1.1 节式(3)所建对数模型适用于 10 °C 和 20 °C 条件下输液流速对输液精度的影响。表 4 中,在 30 °C 时,各时间下的输液流速与流速误差曲线符合双曲线模型,且 *R*² 均大于 0.98,拟合优度极高,均方根误差均小于 0.004,模型准确性非常高,因此,1.1 节式(4)所建双曲线模型适用于 30 °C 条件下的输液流速对输液精度的影响。

3.5 小 结

输液时间和输液精度之间的数学模型符合对数模型,

时间增加,实际输液流速减小;输液温度和输液精度之间的数学模型符合对数模型,温度升高,实际输液流速增大。输液流速和输液精度之间的数学模型在 10 °C 和 20 °C 之间符合对数模型,在 30 °C 条件下,符合双曲线模型。单变量模型判定系数均大于 0.96,拟合优度高,RMSE 均小于 0.01,模型具有较高准确性。

4 模型预测

4.1 时间-输液精度模型预测

将剩余输液时间样本(1.5 h、3.5 h 和部分 2.5 h)及其对应的输液流速误差数据作为测试样本数据,与回归方程预测的数据进行误差分析,从而验证模型的预测效果。其中预测值与真实值的相对误差计算公式为:

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{预测值} - \text{真实值}|}{\text{真实值}} \times 100\%$$

表 6 中,从输液时间、输液精度模型预测值与真实值的相对误差分析可知,相对误差均小于 10%,绝大多数误差小于 1%,说明模型预测精度非常高。

表 6 输液时间、输液流速误差模型预测分析表

流速/ (ml·h ⁻¹)	温度/ °C	时间 样本	真实值	预测值	相对 误差/ 100%
	10	1.5 h	-0.056 13	-0.055 27	1.50
100	20	1.5 h	-0.006 36	-0.006 99	9.90
	30	1.5 h	0.017 13	0.016 79	2.00
	10	3.5 h	-0.064 14	-0.064 41	0.40
100	20	3.5 h	-0.014 14	-0.013 78	2.60
	30	3.5 h	0.011 23	0.011 51	2.50
	10	1.5 h	-0.070 30	-0.069 53	1.10
200	20	1.5 h	-0.019 50	-0.020 05	2.80
	30	1.5 h	0.002 57	0.002 32	9.70
	10	3.5 h	-0.078 97	-0.079 23	0.30
200	20	3.5 h	-0.026 94	-0.026 67	1.00
	30	3.5 h	-0.002 83	-0.002 58	8.80
	10	1.5 h	-0.121 16	-0.121 02	0.10
500	20	1.5 h	-0.043 55	-0.043 83	0.70
	30	1.5 h	-0.003 29	-0.003 35	1.70
	10	3.5 h	-0.132 95	-0.133 01	0.04
500	20	3.5 h	-0.048 17	-0.047 96	0.40
	30	2.5 h	-0.007 18	-0.007 16	0.20
	10	1.5 h	-0.172 35	-0.172 30	0.03
1 000	20	1.5 h	-0.064 07	-0.064 43	0.60
	30	1.5 h	-0.005 23	-0.005 55	6.20
	10	2.5 h	-0.177 07	-0.177 31	0.10
1 000	20	2.5 h	-0.067 19	-0.067 25	0.10
	30	2.5 h	-0.009 78	-0.009 72	0.60

4.2 流速-输液精度模型预测

将剩余输液流速样本(500 ml/h)及其对应的输液流速误差数据作为测试样本数据,与回归方程预测的数据进行误差分析,从而验证模型的预测效果。

表 7 中,从输液流速、输液精度模型预测值与真实值的相对误差分析可知,相对误差基本均小于 10%,说明模型预测精度高。

表 7 输液流速、输液流速误差模型预测分析表

温度	时间/ h	流速样本/ (ml·h ⁻¹)	真实值	预测值	相对 误差/ 100%
10 °C	1	500	-0.116 20	-0.127 84	10.0
	2	500	-0.125 09	-0.134 52	7.56
	3	500	-0.130 75	-0.138 56	6.0
20 °C	1	500	-0.041 94	-0.043 20	3.06
	2	500	-0.044 79	-0.047 47	6.0
	3	500	-0.047 13	-0.050 64	7.5
30 °C	1	500	-0.000 16	-0.000 17	6.3
	2	500	-0.005 47	-0.005 67	3.7
	2.8	500	-0.008 08	-0.008 56	6.0

4.3 总模型预测

在 10 °C~20 °C,包含输液时间、输液流速、输液温度和输液流速误差的总模型为 1.2 节式(5)所示,当温度为 30 °C 时,模型为 1.2 节式(6)所示。随机选取 1.5 h-100 ml/h-10 °C、2 h-200 ml/h-20 °C、2.5 h-500 ml/h-10 °C、3 h-1 000 ml/h-10 °C 四组对应的输液流速误差数据(也可选其他数据)作为测试样本,并借助 1stOpt 软件对剩余 10 °C 和 20 °C 条件下所有时间、所有流速的实验数据进行回归拟合,辨识出模型参数,得到拟合方程。拟合结果及模型参数如表 8,预测结果如表 9。

表 8 模型 $y = a \ln v + b \ln T + c \ln t + m$ 参数辨识结果表

$a = -0.036 63, b = 0.098 6$	
$c = -0.007 72, m = -0.115 72$	
回归	均方差=0.01 相关系数 0.96
指标	判定系数 0.93 残差平方和 0.009

表 9 模型 $y = a \ln v + b \ln T + c \ln t + m$ 预测分析表

时间	流速	温度/ °C	真实值	预测值	相对 误差/ 100%
1.5 h	100 ml/h	10	-0.056 13	-0.060 50	7.8
2 h	200 ml/h	20	-0.021 90	-0.019 77	9.7
2.5 h	500 ml/h	10	-0.128 19	-0.123 40	3.7
3 h	1 000 ml/h	10	-0.166 90	-0.150 20	10.0

随机选取 1.5 h-100 ml/h-30 °C、2 h-100 ml/h-30 °C、2.8 h-1 000 ml/h-30 °C、3 h-500 ml/h-30 °C 四组对应的输液流速误差数据作为测试样本,对剩余 30 °C 条件下所有时间、所有流速的实验数据进行回归拟合,拟合结果及模型参数如表 10,预测结果如表 11。

表 10 模型 $y = c \ln t + \frac{a}{v} + m$ 参数辨识结果表

$a = 2.483 76$	
$c = -0.006 82, m = -0.005 83$	
回归	均方差=0.001 相关系数 0.99
指标	判定系数 0.985 残差平方和 2.91×10^{-5}

表 11 模型 $y = c \ln t + \frac{a}{v} + m$ 预测分析表

时间	流速	温度/ °C	真实值	预测值	相对 误差/ 100%
1.5 h	100 ml/h	30	0.017 13	0.016 24	5.2
2 h	100 ml/h	30	0.015 40	0.014 28	7.3
3 h	500 ml/h	30	-0.008 59	-0.008 36	2.7
2.8 h	1 000 ml/h	30	-0.010 92	-0.010 37	5.0

表 8 中,拟合的回归方程如式(8)所示。

$$y = -0.036 63 \ln v + 0.098 6 \ln T - 0.007 72 \ln t - 0.115 72 \quad (8)$$

其中,相关系数 R 为 0.96,说明输液时间、输液温度、输液流速与输液流速误差之间存在明显相关性,判定系数 R^2 为 0.93,拟合优度高,且均方根误差为 0.01 非常小。表 10 中,拟合的回归方程如式(9)所示。

$$y = -0.006 82 \ln t + \frac{2.483 76}{v} - 0.005 83 \quad (9)$$

其中,相关系数 R 为 0.99,说明在 30 °C 条件下,输液时间、输液流速与输液流速误差之间具有极强相关性,判定系数 R^2 为 0.985,拟合优度极高,且均方根误差为 0.001 非常小。此外,表 9 和表 11 中,两个在不同温度所建立的总模型的预测值与真实值的误差均小于 10%,即模型预测精度高,说明所建总模型具有准确性和有效性。

5 结 论

本文为探究不同条件下使用一次性泵用输液器对输液精度的影响,建立了时间、温度、流速与输液精度之间的实验系统,并进行了实验。同时分别建立了单变量模型和总模型,完成了变量拟合、模型的参数辨识和有效性分析。实验结果表明:单变量模型的均方根误差均小于 0.01,判定系数均大于 0.96,总模型的均方根误差小于 0.01,判定系数大于 0.93,单变量模型和总模型预测值与真实值的相

对误差均小于 10%，验证了所建模型的准确性和有效性。

由于一次性泵用输液器面临的输液需求可能受到时间、流速和环境温度的影响，输液泵搭配泵用输液器进行输液时无法保证输液精度。本文所建模型虽然能为标定时间、温度、流速引起的输液误差提供理论依据，但在常温附近或是低流速输液的情况下，模型的适用性略显不足，有待进一步进行实验探究。

参考文献

- [1] 陈飞飞. 输液泵及注射泵质量控制管理方案[J]. 中国医疗器械信息, 2021, 27(13): 184-186.
- [2] 罗蔓, 赖传万. 微量输液泵流速质控中相关问题的探讨[J]. 中国医疗器械信息, 2020, 26(15): 50-51.
- [3] 熊继军, 章婧. 输液泵检测中常遇到的问题及解决方法[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(12): 34-35.
- [4] 侯亚辉, 胡伟, 白岩松, 等. 基于 ARM 的多输液器测控安全防护系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(1): 54-58.
- [5] 孔雪卉, 张慧芬, 焦婷婷. 一种智能输液控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 73-77.
- [6] 黄博, 钱晓萍. 静脉用药调配中心静脉输液安全执行模式的构建与应用[J]. 中国药业, 2021, 30(13): 9-12.
- [7] 朱小平, 胡芬, 曹锐. 重症患者输液安全管理[J]. 中国护理管理, 2018, 18(10): 1311-1316.
- [8] 邸玮, 晏正光, 江选东, 等. 医用输注泵质量控制数据分析研究[J]. 中国医学装备, 2021, 18(1): 175-178.
- [9] 李杰. 影响输液泵注射泵质量控制检测的因素与解决对策[J]. 设备管理与维修, 2020(18): 23-25.
- [10] 刘欣欣, 李永辉, 王芳, 等. 674 例输液泵不良事件回顾性分析[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(3): 145-148.
- [11] 凌文嘉, 陈曼珊, 邓映雪. 不同输液管路的适用性分析[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(2): 90-93.
- [12] 李静. 输液泵性能检测的流速检测[J]. 医疗装备, 2017, 30(1): 37-38.
- [13] 袁东梅, 杨毓素. 输血输液加温器温度设定的临床研究[J]. 名医, 2019(10): 71.
- [14] 郭大哲, 文玉梅, 李平, 等. 非线性磁阻抗传感器检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 24-31.
- [15] 王黎明, 周旭辉, 雷永恒. 温度对 FDR 土壤水分传感器测量影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 46-54.
- [16] 陆佳, 陈帅, 龚纯贵. 不同输液泵组合及夹管时间对流速误差的影响[J]. 中国医疗设备, 2017, 32(4): 91-93, 103.
- [17] 薛燕彬, 高晶敏. 重力输液器用作泵用输液器的输液精度影响[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(9): 84-91.
- [18] 全国医学计量技术委员会. 医用注射泵和输液泵校准规范: JJF 1259-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 2.

作者简介

王洋, 硕士, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: m15297815463@163.com