

# 面向 CPS 的高速公路凝冰短时 预测与主动式防冰控制

张昌利<sup>a</sup>, 孟 颖<sup>a</sup>, 温立民<sup>b</sup>, 李鹏超<sup>a</sup>

(长安大学 a.信息工程学院, b. 电子与控制工程学院, 西安 710064)

**摘 要:**针对影响中国高速公路行车安全与运营效率的冰雪冻雨气象灾害,基于信息物理系统(CPS)理论,设计了面向高速公路路表凝冰短时预测与主动式防冰控制的 CPS 模型.不同于传统的事后处置方式,该 CPS 可以通过主动预测和预先处置手段,防止冰雪灾害发生或降低其危害程度.围绕该 CPS 模型,提出了其信息世界的路表凝冰短时预测算法,并设计了相应的主动式防冰控制策略.其中,凝冰短时预测算法基于热力学理论建模空气温度和路表温度的耦合变化关系,并从凝冰事件的发生可能性及强度两个方面对预测的凝冰风险进行描述;防冰控制策略主要针对一款自研的以喷撒融雪剂方式防冰融冰的 CPS 物理世界装置,根据凝冰风险的可能性及强度分量远程控制该装置按照一定的模式进行工作.基于实测数据的实验分析以及针对实际路段的示范应用表明:该 CPS 具有较精确的凝冰预测精度,30 min 内的平均预测误差约为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;融冰处置可以覆盖高速公路车道约 3/4 的有效行车区域,能够事先避免凝冰或积雪形成或主动降低其危害,因此在我国高速公路的信息化与效率提升建设当中具有较高的实用价值.

**关键词:**交通工程;高速公路;信息物理融合系统;凝冰短时预测;防冰控制策略

**中图分类号:**U495      **文献标志码:**A

## CPS-oriented short-term icing events prediction and proactive anti-ice control for highway systems

ZHANG Changli<sup>a</sup>, MENG Ying<sup>a</sup>, WEN Limin<sup>b</sup>, LI Pengchao<sup>a</sup>

(a. School of Information Engineering, b. School of Electronics and Control Engineering,  
Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** With regard to the meteorological disasters, e.g., ice, snow, and freezing rain, which drastically degrade the transportation safety and efficiency levels of highway systems, a Cyber-Physical System (CPS) model for road surface ice event prediction and proactive anti-ice control is proposed based on related CPS theories in. Different to the traditional post-disposal ideas, this CPS advocates a new concept of beforehand avoidance of road surface-icing, by predicting ice events in advance and conducting proposals

收稿日期:2016-04-22

基金项目:陕西省科技攻关项目(2015GY052);西安市科技计划项目(CXY1512-9);国家留学基金委青年骨干教师出国研修项目(2016-3099)

Foundation item: Key Technologies R&D Program of Shaanxi Province of China(2015GY052); Xi'an Science and Technology Plan Project (CXY1512-9); Abroad Research & Study Program of China Scholarship Council for Young Teachers(2016-3099)

第一作者:张昌利(1979—),男,陕西西安人,副教授,博士.研究方向为智能交通系统、交通信息融合及面向交通的行业信息物理系统.  
email: clzhang@chd.edu.cn.

引用格式:张昌利,孟颖,温立民,等.面向 CPS 的高速公路凝冰短时预测与主动式防冰控制[J].北京交通大学学报,2017,41(3):47-54.  
ZHANG Changli, MENG Ying, WEN Limin, et al. CPS-oriented short-term icing events prediction and proactive anti-ice control for highway systems[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3): 47-54. (in Chinese)

proactively. Then, as the major components in the cyber world of this CPS, the short-term ice event prediction algorithm and the proactive anti-ice control strategy are sketched accordingly. Specifically, the ice event prediction algorithm is capable of modeling the coupling changing effects of air temperature and road-surface temperature with the help of thermal radiation theory, and yields the icing risk estimation on both facets of likelihood and intensity; while the anti-ice control strategy remotely controls the working mode of a particular agent-spraying anti-ice device, deployed in the physical world of this CPS, according to the different likelihood and intensity levels of predicted icing risks. The experiments with actual meteorological data and the demonstration application of this CPS show that: this system can predict icing-event in a rather high precision, with an average prediction error around  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  within 30min period; the ice-melting results are also appreciable, with almost 3/4 of the major traffic lanes area free of ice or slightly affected. In conclusion, this CPS, with its major techniques, will be greatly applicable in the informationizing and efficiency-enhancing construction works of China highway.

**Keywords:** transportation engineering; highway system; cyber-physical systems; short-term icing event prediction; anti-ice control strategy

高速公路是我国道路交通的主动脉,在协调各省、市、区域的社会经济发展中发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。但是,我国幅员广阔、地理环境复杂,导致高速公路沿线气象环境多变,严重阻碍了我国高速公路的安全、高效运营。在诸多气象因素中,冰雪冻雨等恶劣气象条件对高速公路的影响尤为严重:不但会导致轮胎与路面的摩擦系数明显下降,容易引发严重交通事故;还经常迫使高速公路封闭,给人们出行带来不便,也使国家经济利益蒙受损失<sup>[3-4]</sup>。目前国内应对高速公路冰雪灾害的手段主要有地区天气预报、人工喷洒融雪剂、机器除雪破冰、路段封闭等,存在时效性差、损伤路面、损失道路剩余通行能力等弊端。如何以信息化、智能化的手段应对冰雪灾害,特别通过主动预测和预先处置的手段防止冰雪灾害发生或降低其危害程度,是目前我国高速公路安全运营和效率提升所面临的重要任务。

信息物理系统(Cyber-physical Systems, CPS)是一种新兴的分布式系统理论,强调基于计算、通信和控制等技术的物理世界要素与信息世界基元的深度融合,必将成为下一代智能交通系统发展的重要方向<sup>[5-8]</sup>。目前,面向智能交通的CPS已得到国内外越来越广泛的关注,并形成了一系列研究成果。例如,文献[9]提出了一种基于CPS的车载预警系统,在车载单元上建立预测模型,根据节点运动速率来预测下一时刻的节点位置。文献[10]针对交通事故管理,基于仿生法为CPS引入感知控制,以提高交通应急系统对交通事故的响应速度与评估精度。文献[11]则针对汽车控制系统,研究了运行态物理资源与信息资源的协调优化利用问题。在国内,文献[8]通过对比CPS与智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS),提出

了T-CPS概念,并阐述了其框架、特点及内涵。文献[12]通过融合ITS业务,搭建了一个更为详细的交通CPS架构。文献[13]通过研究交通CPS环境下通信延时对司机驾驶决策的影响,提出了对应的宏微观交通拥堵抑制方法。文献[14]则针对交通CPS下车辆间安全通信进行了性能分析,设计了主动式的自适应通信协议。

但是,国内外现有研究大多数仍主要围绕车辆这一物理世界要素展开,重点研究车辆动态网络的通信方法及CPS系统稳定性、健壮性等理论,而针对道路本身及路边机电设施等要素的研究仍相对缺乏,而这些要素对于提升当前公路交通系统能力而言具有更大的作用。因此,本文作者针对我国高速公路的冰雪灾害防治问题,设计了对应的智能交通CPS模型,并提出了相应的凝冰短时预测算法和主动式防冰控制策略,形成以主动预防、预先处置为原则的智能交通系统。实验及应用实践表明:该系统可以预测凝冰事件,并及时有效地防止凝冰形成,从而可以更好地服务于我国高速公路系统的运营管理及效率提升等工作。

## 1 凝冰预测与防冰控制 CPS 建模

本文基于CPS思想,提出一种融合现场气象参数实时探测、计算机辅助预测路面温度趋势、计算机远程控制融雪剂喷洒过程的物理世界操作与信息世界计算相结合的自动化防冰、融冰思路。通过定点喷洒、事先喷洒和精确控制融雪剂用量,可以较好地解决传统方法存在的弊端。该思路可以重点应用于高架道路、隧道出入口、长大下坡、山区背阴面等易凝冰或易发生交通事故的高速公路段,以确保这些路段的行

车安全和通行能力.

具体而言,利用 CPS 建模方法,设计面向高速公路短时凝冰预测与主动式防冰控制的 CPS 控制模型如图 1 所示.该系统由物理世界子系统、信息世界子系统两部分组成:物理子系统按照一定的物理规则感知或作用于现实世界,如感知路表及路边气象状况,或按照特定工作模式执行防冰操作;信息子系统由基于事件机制相互耦合的抽象计算实体组成,通过路表凝冰预测计算及融冰控制决策,作用于物理子系统使之按意图运行.物理子系统和信息子系统之间跨越一定的网络环境相互耦合,形成典型的 CPS 三层架构.

如图 1 所示,该系统的整体工作流程为:①在物理世界,由感知单元感知当前时刻路表温度、空气温度、空气湿度、降水量等气象状况,所形成的数据信号表示为  $x(t)$ ,其中  $t$  为时域变量;② $x(t)$ 作为输入信号通过网络环境传输到信息世界.由于网络传输的影响,将所得信息表示为  $x'(t)$ ,以与原信息进行区分;③在信息世界,以  $x'(t)$ 作为输入进行凝冰预测计算,形成对应的预测结果事件  $e(t)$ ,其事件内容代表了当前控制周期内的路表凝冰风险;④ $e(t)$ 事件进而触发融冰控制决策,形成代表物理世界防冰执行单元工作模式的控制信号  $y(t)$ ;⑤令  $y(t)$ 通过网络传输到达物理世界的信号为  $y'(t)$ ,由防冰执行单元(融雪剂喷洒装置)根据信号指示执行喷洒融雪剂防冰操作,通过密布于道路一侧的喷头将融雪剂均匀喷洒于路面,防止路面凝冰.之后进入下一轮控制循环.

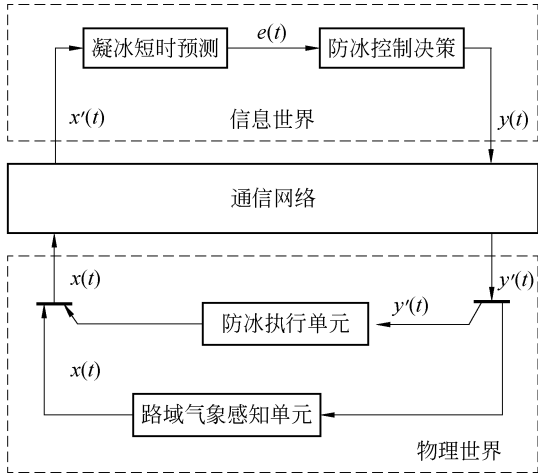


图 1 高速公路凝冰预测与防冰控制的 CPS 模型

Fig.1 CPS model of icing event prediction and anti-ice control for highway systems

此外,从实际应用部署的角度看,通常需要能够对多个独立物理现场进行同步监控.也就是说,对于最终的 CPS,会在不同的物理现场均部署有相同的用

于检测路域气象状况、执行融冰处置的物理单元,形成多个相互平行的物理世界.而相应的信息世界则具有唯一性,主要通过为不同的物理世界维护对应的凝冰预测、防冰控制计算模块实例,来协调与多个物理世界的通信与协同工作.

## 2 凝冰短时预测算法

引起高速公路路表凝冰的因素很多,如空气温度、空气湿度、路表温度、路表面积水状况、降水等.其中,路表及空气温度的变化相对更为频繁,对于路表凝冰而言也更具有决定性的效果.例如,若空气中水汽充沛,随着气温降低会在露点或霜点形成降露甚至降霜;在降水或路表面积水的状况下,路表温度低于凝冰温度时,亦会形成路表凝冰.因此,本文的凝冰预测算法主要分为两个部分,首先对空气温度和路表温度的变化趋势进行短时预测,然后考虑其他影响因素估算路表凝冰风险.

### 2.1 基于热力学规律的路表温度趋势预测

不同于常规的气象学综合天气预报,局部路段现场小气候环境的全面气象观测数据通常无法得到,因此无法利用成熟的气象学理论进行详尽的预测推导.另一方面,由于现场地理环境及气象环境的复杂性,常规的地区气象预报结果也无法准确刻画路段现场的多变气象状况.因此,本文作者需要基于有限的气象参数,通过探究更多的潜在变化规律,形成新的路表温度预测方法.

图 2 所示为中国某地冬季不同气象条件下典型的空气温度、路表温度日变化曲线及变化趋势特征曲线,数据采样周期为 5 min.从图 2 可以看出,无论是晴天或降水天气,路表温度与空气温度之间均具有很强的依赖关系.首先,如图 2(a)、图 2(b)所示,虽然路表温度与空气温度的变化幅值不同,但具有类似的变化规律.其次,如图 2(c)、图 2(d)中的曲线通过相邻采样数据相减除以前值(绝对温度)并归一化得来,可以进一步体现温度变化的趋势特征,可见两种温度的变化趋势具有高度的一致性.此外,考虑到中国不同地域的气候条件差异,本文针对国内其他地区 and 不同气象条件也进行了类似分析,其结论表明:空气温度、路表温度的耦合变化均具有类似的规律.

以上的变化规律可以根据路表与空气之间基于长波辐射的热交换作用进行解释.对于路表而言,其温度的变化主要受太阳短波辐射、与空气的长波热交换、地表感热潜热效应等的影响,具体存在如下的热平衡方程<sup>[15-16]</sup>

$$G_R = S_r + L_R - G_{HLE} \tag{1}$$



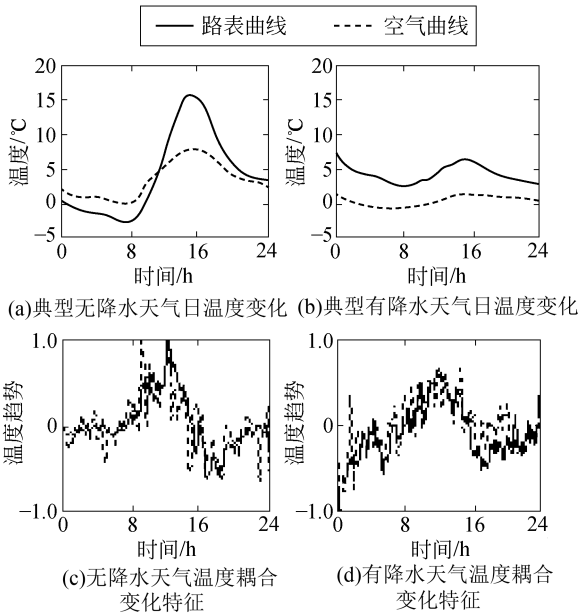


图 2 典型的冬季每日路表与空气温度曲线

Fig.2 Typical curves of daily road-surface and air temperature in winter

式中:  $G_R$  为路表热通量;  $S_r$  为路面受到的太阳短波辐射热通量;  $L_R = L_a - L_r$  为路表所受的净长波辐射热通量,是空气向路表的长波辐射  $L_a$  与路表向空气长波辐射  $L_r$  的综合效应;  $G_{HLE}$  则为潜热、感热的综合效应热通量,上述变量的单位均为  $W \cdot m^{-2}$ 。

显然从路表一侧看,空气温度与路表温度变化的一致性主要体现于二者之间的长波辐射。根据热力学理论,存在

$$\Delta G_R = C_R \rho_R H_R (T_{R1} - T_{R2}) \quad (2)$$

式中:  $\Delta G_R$  表示感知周期内路表温度变化对应的等效热通量累积效应,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $C_R$ 、 $\rho_R$  分别为路面材料的比热容,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$  和密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $H_R$  为有效路表厚度,  $m$ ,即路表各种热效应所能够波及的深度,根据文献[17-18]的研究结论取值为  $0.3 m$ ,并假定认为不同深度温度变化均匀;  $T_{R1}$ 、 $T_{R2}$  分别表示采样周期内的起始温度和最终温度,以绝对温度(K)形式表示。

并且,根据黑体长波辐射理论<sup>[15-16]</sup>,还存在

$$\Delta L_a = \int_0^{\Delta t} \epsilon_A \sigma T_A^4(t) dt \quad (3)$$

$$\Delta L_r = \int_0^{\Delta t} \epsilon_R \sigma T_R^4(t) dt \quad (4)$$

式中:  $\epsilon_A$ 、 $\epsilon_R$  分别为空气和路面材料的显性辐射系数;  $\sigma$  为波尔兹曼常数( $5.6697 \times 10^{-8} J \cdot m^{-2}$ );  $T_A(t)$  和  $T_R(t)$  分别为当前感知周期内空气温度和路表温度随时间变化的函数,可以利用采样周期内的起始温度  $T_{A1}$ 、 $T_{R1}$  及当前温度  $T_{A2}$ 、 $T_{R2}$  进行线性拟合得到。

这样,在采样周期  $\Delta t$  内,则可以通过路表净长波辐射累积通量  $\Delta L_R = \Delta L_a - \Delta L_r$ 、其他热交换累积通量  $\Delta G_R - \Delta L_R$  两个量值来分别表达路表温度与空气温度的耦合效应及非耦合效应。

按照图 2 的对比,以路表温度与空气温度的变化率作为温度预测的主体变量,将两种温度的同步变化建模成两个变化率的耦合关系,其中,路表温度和空气温度的变化率公式分别为

$$v_R = (T_{R2} - T_{R1}) / T_{R1} \quad (5)$$

$$v_A = (T_{A2} - T_{A1}) / T_{A1} \quad (6)$$

按照路表温度变化与空气温度变化的耦合与非耦合关系,设计下一感知周期内路表温度的变化率公式为

$$v_{R1} = (1 - \alpha_R) v_R + \alpha_R \tilde{v} \quad (7)$$

式中:  $\tilde{v}$  为耦合预测分量,代表路表温度、空气温度协同变化的耦合成分;  $\alpha_R$  为耦合权重系数。按照短时线性拟合的思路,路表温度的非耦合预测分量直接采用当前周期的计算值。

进而,根据式(2)~式(4)对路表温度变化规律的分析,设计耦合温度变化率分量  $\tilde{v}$ 、耦合权重系数  $\alpha_R$  的计算公式为

$$\tilde{v} = \frac{|\Delta L_r| v_A + |\Delta L_a| v_R}{|\Delta L_r| + |\Delta L_a|} \quad (8)$$

$$\alpha_R = \frac{|\Delta L_R|}{|\Delta G_R - \Delta L_R| + |\Delta L_R|} \quad (9)$$

其中,式(8)的目的是以  $v_R$  及  $v_A$  作为新一轮预测的基础,根据路表长波辐射、空气逆辐射的作用效果,将路表温度变化率、空气温度变化率耦合在一起,形成综合性的耦合预测分量  $\tilde{v}$ ; 式(9)则是对当前感知周期路表净长波辐射累积通量  $\Delta L_R$  在引起路表温度变化中所起作用的量化,以此作为下一感知周期耦合预测分量  $\tilde{v}$  的预测权重  $\alpha_R$ 。

这样,利用以上的计算结果,可得下一采样时刻的路表温度、空气温度预测值为

$$T_{R1} = T_{R2} (1 + v_{R1}) \quad (10)$$

式(10)为基于当前温度值  $T_{R2}$  和预测温度变化率  $v_{R1}$  的线性拟合。

而对于近地空气而言,根据对流层空气的热量传播特性,其热量来源主要为下垫面(包括公路路表)的长波热辐射。但是由于高速公路沿线周边的复杂地貌环境,以及频繁的空气对流影响,路表散热对于近地空气的温度变化的影响并不恒定。因此,空气温度的预测仍采用常规的线性预测方式。

### 2.2 凝冰风险综合评估

风险是对给定环境下、给定时间段内潜在损失的度量,通常包括损失发生概率及损失强度两个维度的信息.利用路表温度与空气温度的预测结果,可以对路表凝冰风险的可能性进行衡量,温度下降越剧烈或者越接近冰点,路面凝冰的概率则越大.具体而言,令  $T_0=273.15\text{ K}$  表示冰点绝对温度,则若温度变化满足  $T_{R1} < T_{R2}$  且  $T_{R2} > T_0$  (即当前温度高于冰点但预测存在下降趋势),定义路表凝冰风险的概率维度指标为

$$R_p = 1 - \exp(-\frac{T_{R2} - T_0}{T_{R2} - T_{R1}})$$

(11)

该公式实际上描述了按照预测的趋势路表温度达到冰点的时间紧迫程度.温度变化越剧烈,紧迫程度就越高,  $R_p$  取值也越接近于 1;反之则紧迫程度越低,  $R_p$  取值越接近于 0.

另一方面,除温度以外,路表积水则是导致路表凝冰的另一个关键因素,路表积水越多,凝冰所造成的危害越大.导致路表积水的因素很多,如遗留积水、降水、结露结霜等.因此,基于预测气温、空气湿度、气压、降水、路表湿度等 CPS 物理世界感知单元所获取的其他路域气象要素,设计凝冰风险强度的判断过程如图 3 所示.该过程由一系列模糊规则组成,首先基于常规的气象学计算判断空气中产生结露或结霜的可能性,然后结合降水、路表湿度数据对路面积水状况进行判断,最终形成路表凝冰的风险强度  $R_D$ . 这里,按照气象领域与工程领域的相关标准<sup>[19]</sup>,将  $R_D$  取值范围定义为模糊值集合{结霜,薄冰,冰,强冰},由 4 个依次递进的模糊量值组成.

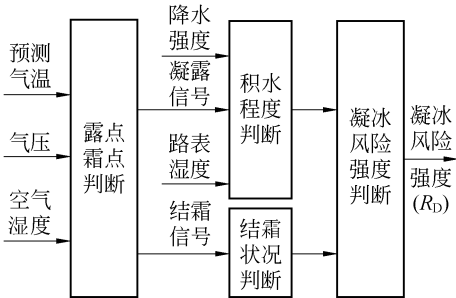


图 3 路表凝冰风险强度决策过程

Fig.3 Decision process for the intensify aspect of road-surface icing risk

### 3 主动式防冰执行装置及控制策略

相比于常规的事后应对冰雪灾害的手段(如人工喷洒融雪剂、机器除雪破冰、路段封闭等),主动式防冰侧重于在路表凝冰形成之前便实施必要的融冰处

置动作,达到避免、延缓或削弱路表凝冰的目的.国内外目前可见的主动式防冰方法如地热防冰、电加热防冰等,大都利用高速公路沿线的独特自然条件,控制路面温度不低于冰点,在国内高速公路实施仍存在较大的困难.相比而言,本文作者提出一种更易实施的喷洒融雪剂防冰办法,对公路沿线环境要求不高,更适合进行大范围布设.

该方法涉及的核心装置如图 4 所示,由融雪剂储液罐、路边喷洒管路、控制板等部件组成.首先,融雪剂预先存储于储液罐当中,通过水位传感器对其储量进行实时探测.当接收到工作命令后,控制模块则控制增压泵和电动阀组合工作,完成融雪剂喷洒任务.喷洒管路布设于高速公路沿线,通过特制的扁平式喷头,可以将融雪剂均匀喷洒于路面,基本可以覆盖道路的主要通车区域.为了确保具有足够的压力,喷头通常按顺序依次工作.

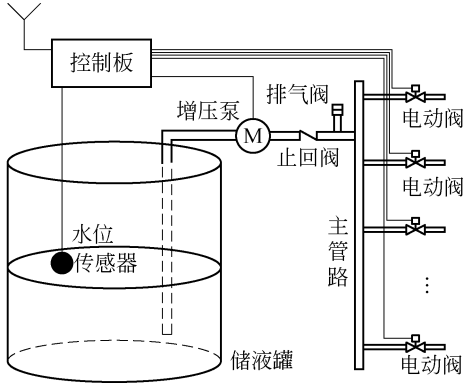


图 4 主动式喷洒融雪剂防冰装置原理图

Fig.4 Diagram of the agent-spraying proactive anti-ice device

针对不同的喷洒紧迫性要求,该装置具有间隔喷洒、全部喷洒两种工作模式.全部喷洒模式下,所有喷头依次工作,具有更大的喷洒强度,适用于紧迫的融冰或防冰任务.因为特殊设置的喷头排列密度,间隔喷洒同样也可以覆盖整个防冰路段,但其喷洒强度仅为全部喷洒的一半,而其工作耗时显然更少,适用于不太紧迫的防冰任务.具体而言,假设各喷头电动阀启动前的主管路排气时间为  $T_E$ ,各喷头工作时间为  $T_S$ ,喷头数量为  $N$ ,则喷洒系统每次工作的时间可按下式进行估算

$$T = \begin{cases} NT_S + T_E, & \text{(模式 I)} \\ \frac{N}{2}T_S + T_E, & \text{(模式 II)} \end{cases}$$

(12)

式中:模式 I、II 分别指代全部喷洒和间隔喷洒两种模式.通常,  $T_E$  与主管路长度有关,  $T_S$  为预设常数.根据实践经验,  $T_E$  和  $T_S$  分别以 10 s、15 s 计,喷头布设间距为 2.5 m,对于 200 m 长的监控现场道路,全部喷洒

模式下的喷洒时间约为 20 min,间隔喷洒模式下约为 10 min.

表 1 给出了基于路表凝冰风险的主动式防冰控制策略示意图.该策略在路表凝冰预测的基础上,参考了突发事件的警报级别<sup>[20]</sup>,对接收到的凝冰

表 1 主动式防冰控制策略

Tab.1 Proactive anti-ice control policy

严重程度	预警级别			
	绿 ( $R_P<0.4$ )	黄 ( $0.4\leq R_P<0.6$ )	橙 ( $0.6\leq R_P<0.9$ )	红 ( $R_P\geq 0.9$ )
结霜	—	—	I	I
薄冰	—	I	I	II
冰	I	I	II	II
强冰	I	II	II	II

风险概率指标进行离散化处理,以绿、黄、橙、红等颜色标识路表凝冰的可能性及防冰处置的紧迫程度.在此基础上,根据路表凝冰风险的可能性维度及强度维度取值,控制融雪剂喷洒装置按照一定的模式工作.例如,对于结霜,仅在紧迫程度较高时方进行轻

表 2 某高速公路路段冬季不同气象条件下的路表温度预测数据分析

Tab.2 Analyses of road-surface predictions under different weather conditions in winter considering

a given highway segment

序号	天气状况	空气温度	路表温度	预测算法误差(均值/方差)		线性回归误差(均值/方差)	
				30 min	60 min	30 min	60 min
1	晴	4.5~13.0	2.0~21.0	0.145 5/0.018 8	0.245 7/0.042 7	0.705 3/0.444 1	1.372 0/1.662 3
2	晴	1.5~13.0	3.5~21.5	0.292 8/0.076 9	0.593 8/0.277 2	0.695 5/0.413 7	1.363 1/1.614 9
3	晴	3.5~12.0	0.5~20.0	0.188 0/0.031 2	0.347 4/0.071 5	0.714 2/0.469 6	1.390 2/1.850 8
4	阴/云	0.5~8.5	4.0~15.5	0.207 6/0.027 3	0.382 1/0.093 0	0.512 2/0.197 8	0.975 6/0.768 8
5	阴/云	1.5~9.5	2.5~11.0	0.203 2/0.035 8	0.390 8/0.128 1	0.347 7/0.184 5	0.643 6/0.613 1
6	阴/云	-2.5~5.0	-2.0~15.0	0.107 8/0.009 9	0.200 4/0.047 2	0.750 3/0.559 8	1.375 6/1.763 3
7	降雨	0.5~3.0	0.5~7.0	0.071 6/0.000 8	0.144 8/0.003 9	0.218 0/0.041 2	0.399 6/0.119 5
8	降雨	0.0~2.2	3.0~9.0	0.039 6/0.000 1	0.089 9/0.000 3	0.375 7/0.358 3	0.665 8/0.843 4
9	降雨	-0.5~3.5	0.5~7.0	0.076 1/0.000 8	0.144 8/0.003 9	0.218 0/0.041 2	0.399 6/0.119 5
10	降雪	-5.0~ -0.5	-5.0~1.2	0.081 9/0.001 1	0.165 4/0.006 8	0.336 2/0.167 2	0.604 0/0.339 4
11	降雪	-4.0~ -2.5	-3.0~0.0	0.029 5/0.000 1	0.055 8/0.000 2	0.243 1/0.196 6	0.415 1/0.266 5
12	降雪	-2.5~1.5	-3.0~5.5	0.031 4/0.001 3	0.077 4/0.005 2	0.465 5/0.232 8	0.790 8/0.591 9
合计				0.122 9/0.076 9	0.236 5/0.277 2	0.465 1/0.559 8	0.866 3/0.768 8

例如,针对图 2(a)、图 2(b)使用的两种典型的冬季气候条件下的路表温度、空气温度,所形成的预测温度情况如图 5 所示.与图 2 对比可见,通过合理设定短时预测周期,可以使预测结果较好地吻合实际的温度变化.特别是在温度变化相对平缓的时间段内,预测结果与实际温度变化几乎完全吻合.

表 2 进一步给出了更多预测案例及误差综合分析,其中误差统计使用了每个采样点的误差绝对值.从表 2 可以发现,相比于常规的线性回归预测,由于本文算法考虑了空气温度与路表温度的耦合变化关

度喷洒(模式 I);随着凝冰严重程度的提升,喷洒模式也逐渐向重度喷洒(模式 II)转变;对于强冰状况,即便凝冰紧迫性较低,也需提前适度喷洒融雪剂,进一步防止严重凝冰事件的发生.

4 实验分析与验证

为了验证系统中凝冰预测方法的有效性,本文利用从云南省某高速公路路段现场采集的气象条件数据,对不同天气状况下的路表温度预测情况进行实验分析.该路段地处山区丘陵地带,海拔较高,早晚温差巨大.因此,该地区同时具有高湿、高寒两个气候特征,并且日气温变化更为剧烈,具有极强的代表性.原始数据采集精度为 5 min,采集时间段为 2015 年 12 月~2016 年 1 月.为了便于实验分析,分别按照 30 min、60 min 对原始数据进行重新采样处理,并按照相同周期对预测温度与实际温度进行对比,得到的数据分析结果如表 2 所示.

系,其预测误差明显降低,30 min 周期下平均误差低于±0.2 ℃,60 min 周期下平均误差低于±0.3 ℃,且二者均约为常规线性预测误差的 1/4.并且,根据不同的天气状况,随着每日空气温差或路表温差减小,预测误差还会相应变小.

图 6 所示为降雪条件下,采用本文凝冰预测算法及防冰处置策略的 CPS 系统在云南省某高速公路路段的使用效果照片.如图 6 所示,该路段为某个山区高架桥,属于一个事故多发路段,于当晚出现降雪.由于路边装置主动喷洒融雪剂的原因,约 3/4 的

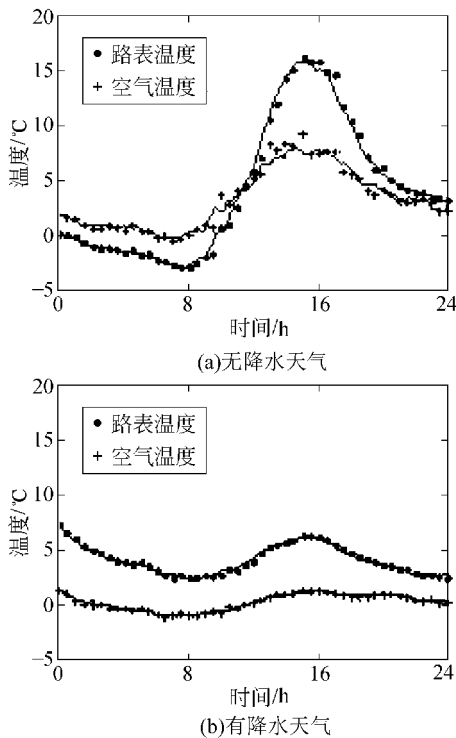


图 5 路表与空气温度预测曲线示例

Fig.5 Example curves of predicted daily road-surface and air temperature

主体行驶区域并未受到冰雪覆盖.图 6(a)中喷洒设备远端虽仍有一部分积雪,但由于路面已有一定的融雪剂,加之天亮后气温有所回升以及行车碾压等的综合作用,截至上午 9 时,路面凝冰和积雪几乎完全消除,从而维持了该路段的通行能力,并确保了该路段的行车安全.



(a) 主动喷洒融雪剂后效果(凌晨6:00)



(b) 出现行车2h后效果(上午9:00)

图 6 主动式防冰效果照片

Fig.6 Photos of proactive anti-ice effect

## 5 结论

1)针对高速公路冰雪灾害防治问题,基于信息物理系统(CPS)理论,设计了面向高速公路凝冰预测与主动式防冰控制的信息物理系统模型,并围绕该模型设计了信息世界的凝冰短时预测、主动式防冰控制决策等关键算法.与常规的事后处置方法不同,本系统可以通过事先预测凝冰事件和预先喷洒融雪剂,避免路面凝冰的形成,从而确保高速公路的畅通和行车安全.

2)本系统具有较为精确的短时预测精度,30 min 内的预测误差小于 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可以满足我国高速公路凝冰处置的温度预测要求;融冰喷洒控制基本可以覆盖高速公路路段约 3/4 的主要行车区域,避免这些区域发生凝冰或积雪现象,或降低其危害程度.

## 参考文献(References):

[1] 中国交通运输部. 2015 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京:中国交通运输部,2016.  
Minister of Transport of PRC. Statistical bulletin of transportation industry development in 2015 [R]. Beijing: Minister of Transport of PRC, 2016. (in Chinese)

[2] 中国公路学报编辑部. 中国公路交通学术研究综述[J]. 中国公路学报,2012,25(3):2—50.  
Editorial Office of China Journal of Highway and Transport. An academic research summary on China highway and transport[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3):2—50. (in Chinese)

[3] 包左军,汤筠筠,李长城,等. 道路交通安全技术丛书:公路交通安全与气象影响[M]. 北京:人民交通出版社,2008.  
BAO Zuojun, TANG Junjun, LI Changcheng, et al. Road safety technologies series: road safety and meteorology influence [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)

[4] 罗慧,李良序,胡胜,等. 公路交通事故与气象条件关系及其气象预警模型[J]. 应用气象学报,2007,18(3):350—357.  
LUO Hui, LI Liangxu, HU Sheng, et al. The relationship between road traffic crashes and meteorological condition with construction of its road weather warning model[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(3):350—357. (in Chinese)

[5] KIM K D, KUMAR P R. Cyber physical systems: A perspective at the centennial [J]. IEEE Special Centennial Issue, 2012, 100:1287—1308.



- [6] HUA F, LU Y, VASILAKOS A V, et al. Robust cyber-physical systems: concept, models, and implementation[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2016, 56:449–475.
- [7] XIONG G, ZHU F, LIU X, et al. Cyber-physical-social system in intelligent transportation[J]. *Journal of Automatica Sinica*, 2015, 2(3):320–332.
- [8] 孙棣华,李永福,刘卫宁,等. 交通信息物理系统及其关键技术研究综述[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(1):144–155.
- SUN Dihua, LI Yongfu, LIU Weining, et al. Research summary on transportation cyber physical systems and the challenging technologies[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(1): 144–155. (in Chinese)
- [9] FALLAH Y P, HUANG C L, SENGUPTA R, et al. Design of cooperative vehicle safety systems based on tight coupling of communication, computing and physical vehicle dynamics[C]//*Proceedings of the 1st International Conference on Cyber-physical Systems*, New York, USA, 2010.
- [10] WANG Y, TAN G, WANG Y, et al. Perceptual control architecture for cyber-physical systems in traffic incident management[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2012, 58:398–411.
- [11] BRADLEY J M, ATKINS E M. Optimization and control of cyber-physical vehicle systems[J]. *Sensors*, 2015, 23020–23049.
- [12] 龚葵,李苏剑,邢恩辉. 综合交通信息物理系统研究[J]. *计算机科学*, 2014, 41(11):43–46.
- GONG Yan, LI Sujian, XING Enhui. Comprehensive transportation cyber-physical system [J]. *Computer Science*, 2014, 41(11):43–46. (in Chinese)
- [13] 周桐. CPS 环境下基于驾驶行为的交通拥堵特征及抑制方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
- ZHOU Tong. Study on driving behavior-based congestion characteristics and congestion control methods in cyber physical systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [14] 姚远. 交通 CPS 环境下车辆主动式安全通信性能分析与协议优化[D]. 西安:西北工业大学, 2015.
- YAO Yuan. Analysis and optimization of vehicle safety communication in the transportation cyber physical system environment [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)
- [15] SASS B H. A numerical forecasting system for the prediction of slippery road[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(6):801–824.
- [16] 牛生杰,李蕊,吕晶晶,等. 三种下垫面温度及结冰预报模型研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4):909–917.
- NIU Shengjie, LI Rui, LYU Jingjing, et al. Research on a numerical model for predicting three types of underlying surface temperature and ice [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4): 909–917. (in Chinese)
- [17] 徐慧宁,张锐,谭忆秋,等. 季节性冰冻地区冬季路面温度分布规律[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(2):7–14.
- XU Huining, ZHANG Rui, TAN Yiqiu, et al. Temperature distribution of pavement in seasonally frozen regions in winter[J]. *Chinese Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(2): 7–14. (in Chinese)
- [18] 庄传仪,王林,申爱琴,等. 沥青路面路表温度预估模型研究[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(3):39–43.
- ZHUANG Chuanyi, WANG Lin, SHEN Aiqin, et al. Prediction model of surface temperature of asphalt pavement[J]. *Chinese Journal of Highway and Transport*, 2010, 27(3): 39–43. (in Chinese)
- [19] 中国气象局. 中华人民共和国气象行业标准:高速公路交通气象条件等级: QX/T 111—2010[S]. 北京:气象出版社, 2010.
- China Meteorological Bureau. PRC meteorological industry standard: highway transportation meteorological condition levels : QX/T 111—2010 [S]. Beijing: Meteorological Press, 2010. (in Chinese)
- [20] 中国国务院. 国家突发公共事件总体应急预案 [R]. 北京:中国法制出版社, 2015.
- The Central People's Government of PRC. General response plan for national public emergency[R]. Beijing: China Legal Publishing House, 2015. (in Chinese)