

空气弹簧组件对列车磁悬浮系统的影响

刘恒坤 王 泉 涂 俊

(湖南凌翔磁浮科技有限责任公司, 410028, 长沙)

摘 要 [目的] 为研究作为组件之一的空气弹簧对列车磁悬浮系统的影响, 解决磁浮列车磁悬浮系统因空气弹簧的影响而导致的悬浮性能变差的问题, 开展了空气弹簧对磁悬浮系统性能影响的机理研究和仿真分析。[方法] 首先建立不含空气弹簧的磁悬浮模型, 并在此基础上设计控制算法, 根据磁悬浮系统的性能指标, 设计其最优控制参数; 在控制算法和最优控制参数确定之后, 再将空气弹簧的影响考虑到磁悬浮系统模型中, 以研究空气弹簧的刚度对磁悬浮性能的影响。采用 MATLAB 软件对磁悬浮系统的性能进行了仿真, 仿真过程中, 在不改变控制参数时改变空气弹簧的刚度, 以观测磁悬浮性能的变化情况; 当磁悬浮性能变差时, 通过优化控制参数, 使得磁悬浮性能保持最优。[结果及结论] 仿真结果表明: 当空气弹簧的刚度在某一范围内时, 刚度越大越不利于磁悬浮系统的稳定; 在空气弹簧的刚度增大时, 适当增加控制系统的刚度和阻尼会有利于磁悬浮系统的稳定。**关键词** 列车磁悬浮系统; 空气弹簧; 刚度和阻尼; 稳定性
中图分类号 U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.054

Influence of Air Spring Components on Maglev Train System

LIU Hengkun, WANG Quan, TU Jun

(Hunan Lingxiang Maglev Technology Co., Ltd., 410028, Changsha, China)

Abstract [Objective] To study the influence of air springs on maglev train system as one of the components, and solve the problem of deteriorated suspension performance in maglev train system due to the influence of air springs, the mechanism research and simulation analysis of the above problem are carried out. [Method] First, a maglev model without air springs is built, and based on this, a control algorithm is designed. According to the performance indicators of the maglev system, the optimal control parameters are designed. After determining the control algorithm and optimal control parameters, the influence of air springs is considered in the maglev system model to study the influence of air spring stiffness on maglev suspension performance. The performance of the maglev system is simulated using MATLAB software. During the simulation process, the air spring stiffness is changed without changing the control

parameters, and the changes in maglev suspension performance are observed. When the maglev suspension performance deteriorates, the optimal suspension performance is maintained through optimizing control parameters. [Result & Conclusion] Simulation results show that the air spring stiffness is within a certain range, and the greater the stiffness, the less conducive to the maglev system stability. When the air spring stiffness increases, increasing the stiffness and damping of the control system appropriately is beneficial for the stability of the maglev system.

Key words maglev train system; air spring; stiffness and damping; stability

近年来,随着磁悬浮列车技术的飞速发展,磁悬浮技术引起了广泛的关注。长沙磁悬浮线和北京 S1 线的顺利运行,以及湖南、北京、河北、山西、江苏、广东等地多条磁悬浮规划线或在建线的实施,标志着我国磁悬浮轨道交通产业已进入大发展的起始阶段。磁悬浮控制技术是磁悬浮列车系统的关键技术,稳定磁悬浮是磁悬浮列车的根本。影响磁悬浮列车稳定悬浮的因素很多,如轨道、负载、悬浮电磁铁、间隙传感器、牵引电机、转向架、空气弹簧等。磁悬浮列车在运营过程中的结果表明,空气弹簧的刚度对列车的稳定性具有较大的影响。关于磁悬浮列车的空气弹簧组件,众多文献已分析了空气弹簧本身的特性。文献[1]基于 Simpack 动力学仿真软件,建立了带有附加气室的空气弹簧动力学模型,并对其进行了试验验证,研究了节流孔直径、附加气室容积对空气弹簧动力学的影响;文献[2]分析了中低速磁浮列车空气弹簧帘线角度、附加气室容积和节流孔直径等参数对空气弹簧的影响,并用试验验证了理论计算的正确性;文献[3]以高速磁悬浮列车为研究对象,建立了包含空气弹簧的磁浮列车动力学模型,模拟计算了车辆低速通过小半径曲线的动力学响应;文献[4]研究了空气弹簧物理参数对中低速磁悬浮车辆动力学性能的影响;文献[5]等介绍了中低速磁悬浮列车采用新

型空气弹簧的设计、有限元分析计算和试验情况。但鲜有资料研究空气弹簧的刚度对列车磁悬浮系统的影响。本文主要分析空气弹簧的刚度对磁悬浮控制系统的影响。

1 不考虑空气弹簧时的单点磁悬浮模型

在不考虑空气弹簧对列车磁悬浮系统的影响,且假设轨道为刚性轨道时,单点磁悬浮系统的建模如下。

以向下为正,单点磁悬浮系统的动力学方程为:

$$m\ddot{s} = mg - F \quad (1)$$

式中:

s ——电磁铁和轨道面的间隙(悬浮间隙);

m ——电磁铁的质量;

g ——重力加速度;

F ——电磁铁与轨道之间的作用力。

在任何瞬时的电磁吸引力 F 为:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A_m i^2}{4s^2} \quad (2)$$

式中:

i ——电磁铁线圈中的电流;

R ——电磁铁线圈的等效电阻;

N ——线圈的匝数;

A_m ——电磁铁的有效极面积;

μ_0 ——真空磁导率。

为了便于表达,令:

$$k = \frac{\mu_0 N^2 A_m}{4} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)可得单点磁悬浮系统的动力学方程为:

$$m\ddot{s} = mg - k \frac{i^2}{s^2} \quad (4)$$

电磁铁绕组回路的电压 u 的计算式为:

$$u = Ri + \frac{d(L \cdot i)}{dt} \quad (5)$$

式中:

L ——线圈的等效电感;

t ——时间。

$$L = \frac{2k}{s} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得:

$$u = Ri + \frac{2k}{s} i' - \frac{2ki}{s^2} \dot{s} \quad (7)$$

式(4)和式(7)即为单点磁悬浮系统的基本

模型。

由式(4)和式(7)得出单点磁悬浮系统的模型如式(8)所示。

$$\begin{cases} \dot{s} = v \\ \dot{v} = g - \frac{ki^2}{ms^2} \\ i' = -\left(\frac{s}{2k}R - \frac{v}{s}\right)i + \frac{s}{2k}u \end{cases} \quad (8)$$

式中:

v ——列车悬浮方向上的速度。

2 控制参数设计

对于磁悬浮系统的控制,通常可以采用PID(比例-积分-微分)控制方法实现稳定控制。为了将磁悬浮系统线性化,首先求出磁悬浮系统的奇点,令:

$$\begin{cases} \dot{s} = v = 0 \\ \dot{v} = g - \frac{ki^2}{ms^2} = 0 \\ i' = -\left(\frac{s}{2k}R - \frac{v}{s}\right)i + \frac{s}{2k}u = 0 \end{cases} \quad (9)$$

解联立方程(9)可以求得磁悬浮系统的两个奇点:

$$s_1 = (u_0/R) \sqrt{k/mg}, \text{ 对应的 } v_1 = 0, i_1 = u_0/R \quad (10)$$

$$s_2 = -(u_0/R) \sqrt{k/mg}, \text{ 对应的 } v_2 = 0, i_2 = u_0/R \quad (11)$$

式中:

u_0 ——列车稳定悬浮时需要的电压。

由于式(11)与实际情况不符合,所以这里只讨论式(10)情况下磁悬浮系统的稳定性,设 s_0 为奇点处的悬浮间隙,现取 s_1 值。

令: $s_0 = (u_0/R) \sqrt{k/mg}$, 对应的 $v_0 = 0, i_0 = u_0/R$ 。在奇点附近,磁悬浮系统的各个变量可以表示如下:

$$s = s_0 + \Delta s, v = v_0 + \Delta v, i = i_0 + \Delta i, u = u_0 + \Delta u$$

在奇点附近将磁悬浮系统线性化得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{s} = \Delta v \\ \Delta \dot{v} = (2g/s_0) \Delta s - (2/s_0) \sqrt{kg/m} \cdot \Delta i \\ \Delta \dot{i} = \sqrt{kg/m} \Delta v - (Rs_0/2k) \Delta i + (s_0/2k) \Delta u \end{cases} \quad (12)$$

为了简化问题,考虑采用快速电流环技术,将电磁铁电流和电压之间的传递函数等效为比例环节,同时为表示方便,用 x 替换 $\Delta s, v$ 替换 $\Delta v, u$ 替换

Δu , 式(12)可写成式(13)形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = x(2g/s_0) - (2g/s_0) \sqrt{kg/m} \cdot u \end{cases} \quad (13)$$

对于上述模型,采用PD(比例-微分)控制:控制量为 $(u + k_p x + k_d v)$ 。

磁悬浮系统式(13)的闭环状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = (2g/s_0)x - (2g/s_0) \sqrt{kg/m} \cdot (u + k_p x + k_d v) \end{cases} \quad (14)$$

对某磁悬浮列车单点系统有 $s_0 = 0.008 \text{ m}$, $m = 195 \text{ kg}$, $k = 0.00264$, 则式(14)变化为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = 2450x - 2.8614(u + k_p x + k_d v) \end{cases} \quad (15)$$

此时,磁悬浮系统式(15)对应的闭环系统传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = \frac{-2.8614}{s^2 + 2.8614k_d s + (2.8614k_p - 2450)} \quad (16)$$

二阶系统传递函数的标准形式为:

$$G_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (17)$$

式中:

ω_n ——二阶系统的自然频率;

ζ ——二阶系统的阻尼。

若二阶系统的性能指标设计为:超调为5%,调节时间为0.1 s,即:

$$e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} = 0.05 \quad (18)$$

$$\frac{4}{\zeta\omega_n} = 0.1 \quad (19)$$

由式(17)、(18)、(19)可以求出: $\zeta = 0.6903$; $\omega_n = 57.9458$ 。把求得的 ζ 和 ω_n 代入式(17), 并对比式(16)和式(17), 可得: $k_p = 2029.7$; $k_d = 27.9583$ 。

3 考虑空气弹簧时的单点磁悬浮模型

在磁浮列车系统中,空气弹簧可以等效为一个弹簧阻尼,如图1所示。其中:图1a)是空气弹簧处于自然状态时的情况;图1b)是车体质量非零且车体和悬浮模块均保持静态时的情况;图1c)是车体质量非零且车体与悬浮模块均处于动态时的情况。设 k_s 和 c_s 分别为空气弹簧的刚度和阻尼系数, m_1

和 m_2 分别为空气弹簧以下的质量和空气弹簧以上的质量, r_0 为静态情况下空气弹簧相对自然长度的压缩量, $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 分别为动态情况下空气弹簧以下部分和空气弹簧以上部分相对静态情况下的位移,正方向为竖直向上。

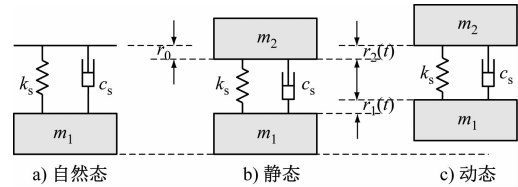


图1 空气弹簧的等效结构

Fig. 1 Equivalent structure of air spring system

设 N_0 和 $N(t)$ 分别为静态和动态情况下空气弹簧对车体的作用力,由图1b)和图1c)可得:

$$\begin{cases} N_0 = k_s r_0 = m_2 g \\ N(t) = k_s [r_0 + r_1(t) - r_2(t)] + c_s [\dot{r}_1(t) - \dot{r}_2(t)] \end{cases} \quad (20)$$

空气弹簧以上部分的竖向运动方程为:

$$m_2 \ddot{r}_2(t) = N(t) - m_2 g \quad (21)$$

将式(20)代入式(21)中,经拉氏变换可得:

$$r_2(s) = \frac{c_s s + k_s}{m_2 s^2 + c_s s + k_s} r_1(s) \quad (22)$$

设 $\Delta N(t)$ 为动态情况下空气弹簧作用力相对静态情况下的变化量,即:

$$\begin{aligned} \Delta N(t) &= N(t) - N_0 = \\ &= k_s [r_1(t) - r_2(t)] + c_s [\dot{r}_1(t) - \dot{r}_2(t)] \end{aligned} \quad (23)$$

进行拉氏变换可得:

$$\begin{aligned} \Delta N(s) &= k_s [r_1(s) - r_2(s)] + \\ &+ c_s [r_1(s) - r_2(s)] s \end{aligned} \quad (24)$$

将式(22)代入式(24)中,经整理得:

$$\Delta N(s) = \frac{m_2(c_s s + k_s)}{m_2 s^2 + c_s s + k_s} r_1(s) s^2 \quad (25)$$

设 $a_1(t) = \ddot{r}_1(t)$ 为空气弹簧以下的运动加速度,则有:

$$a_1(s) = r_1(s) s^2 \quad (26)$$

结合式(25)和式(26),可以得到空气弹簧作用力的变化量 $\Delta N(t)$ 与空气弹簧以下部分运动加速度 $a_1(t)$ 之间的传递函数关系为:

$$G_{\Delta N}(s) = \frac{\Delta N(s)}{a_1(s)} = \frac{m_2 c_s s + m_2 k_s}{m_2 s^2 + c_s s + k_s} \quad (27)$$

对于式(12),考虑采用快速电流环技术,则电流的响应时间可忽略,为便于表达,用 x 替换 Δs , v 替换 Δv , u 替换 Δu ,式(12)可改写为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = (2g/s_0)x - (2g/s_0)\sqrt{kg/m} \cdot u \end{cases} \quad (28)$$

同样采用 PD 控制,将式(28)的第二个方程进行拉氏变换,并将式(27)代入后可得:

$$x(s)s^2 = (2g/s_0)x(s) - \frac{m_2 c_s s + m_2 k_s}{m(m_2 s^2 + c_s s + k_s)} x(s)s^2 + \frac{m_2 c_s s + m_2 k_s}{m(m_2 s^2 + c_s s + k_s)} x(s)s^2$$

对于上述磁悬浮系统,可以用解析法分析磁悬

浮系统的稳定性,但是计算过程很复杂,为此,采用 MATLAB 软件的仿真计算方法,分析空气弹簧的刚度对磁悬浮系统性能的影响。

4 仿真计算结果

对某磁浮列车单支点系统,额定悬浮间隙 $s_0 = 0.008$ m,电磁铁的质量 $m = 195$ kg,电磁铁的电磁常数 $k = 0.00264$,空气弹簧以上的质量 $m_2 = 900$ kg,空气弹簧的阻尼 $c_s = 600$ N·s/m,空气弹簧的刚度 $k_s = 50\,000 \sim 90\,000$ kN/m。对磁悬浮系统采用 PID 控制,其中空气弹簧刚度不同时的悬浮间隙响应仿真结果如图2所示。

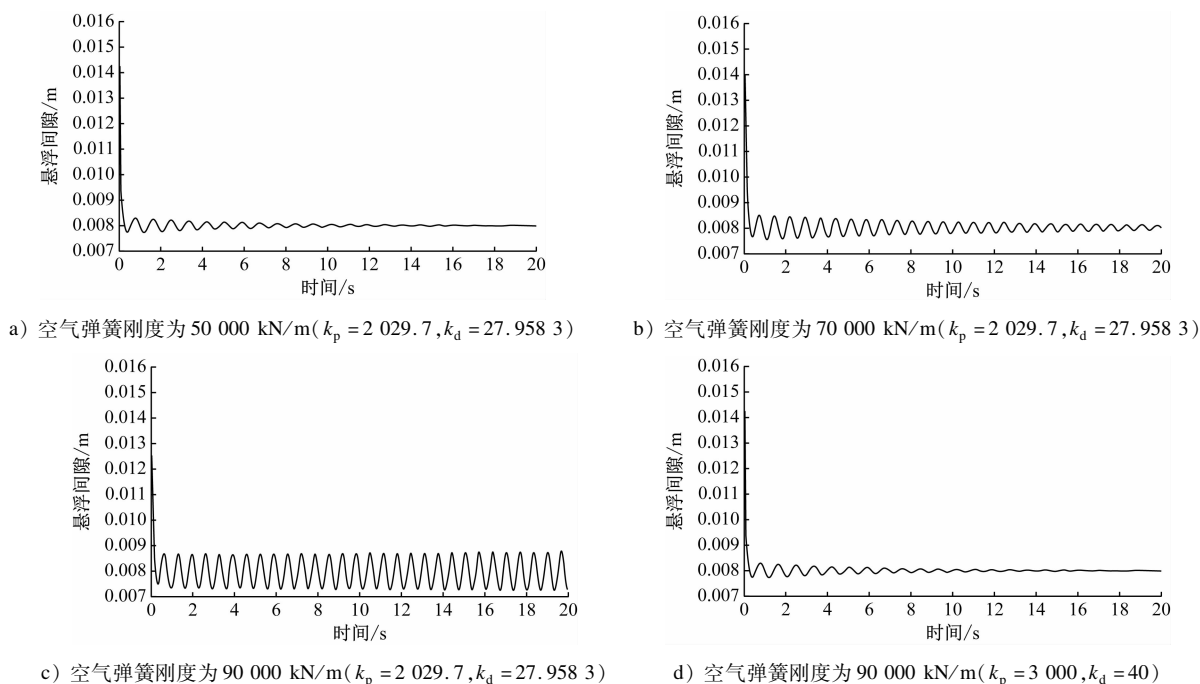


图2 空气弹簧刚度不同时的悬浮间隙响应仿真结果

Fig. 2 Simulation results of elevation gap response under different air spring stiffness conditions

由图2可知,在磁悬浮控制系统的控制参数不变的情况下,当空气弹簧刚度为 50 000 kN/m 时,悬浮间隙收敛时间为 15 s 左右;当空气弹簧的刚度为 70 000 kN/m 时,悬浮间隙收敛时间超过 20 s;当空气弹簧的刚度为 90 000 kN/m 时,悬浮间隙的振荡幅值越来越大,呈现出发散的趋势。空气弹簧的刚度会影响磁悬浮系统的性能,空气弹簧的刚度越大,悬浮间隙的收敛时间就越长,当空气弹簧的刚度超过一定值时,还有可能导致磁悬浮系统不稳定。对比图2 c)和图2 d)可知,空气弹簧刚度较大时,增大控制参数有利于磁悬浮系统的稳定。

5 结语

在磁浮列车的调试过程中,发现空气弹簧的刚度对悬浮性能有影响。为研究该影响,建立了包含空气弹簧刚度参数的系统模型,并利用仿真计算方法研究空气弹簧刚度对悬浮性能的影响。仿真计算结果表明,在控制参数不变的情况下,在某一范围内,空气弹簧的刚度越大,悬浮性能越差。为提高悬浮性能,可以适当增大控制参数或减小空气弹簧的刚度。该结论可为悬浮系统的控制参数的调整和空气弹簧参数的选择作参考。

(下转第 327 页)

设备,接入车载信号系统设备,在列车两端按照表1的逻辑分别操作列车两端的司控器手柄,验证信号系统逻辑判断是否符合设计需求,并在TCMS屏幕上正确显示列车的当前模式。

4 结语

新加坡地铁汤申线列车通过建立司机钥匙与司控器手柄间的安全互锁关系,采用司控器手柄位置判断列车驾驶模式的方法,避免了全自动驾驶模式和人工驾驶模式导致列车激活冲突的问题。此外,列车激活电路采用双路冗余设计,即使一路发生故障,另一路仍可正常工作,不会因单点故障导致列车无法激活正常功能。

通过列车的功能试验,验证了列车激活电路可以由信号系统全自动控制激活,也可由人工控制激活,且只有一种模式有效。列车激活只能在司机室一端激活,先收到激活指令的司机室为激活端,后收到激活指令的司机室不能作为激活端。本文介绍的新加坡地铁汤申线列车激活方法及其激活电路已通过LTA(新加坡陆路交通管理局)的运营考核,可以在我国全自动驾驶列车上推广应用。

参考文献

- [1] 翟国锐,刘宏伟,师秀霞.下一代地铁车辆全自动无人驾驶信号系统关键技术[J].都市快轨交通,2017,30(3):78.

(上接第321页)

参考文献

- [1] 李新君,张耿.基于Simpack的磁浮列车用空气弹簧动力学建模与仿真分析[J].自动化与仪表,2023,38(6):105.
LI Xinjun, ZHANG Geng. Dynamic modeling and simulation analysis of air spring for maglev train based on Simpack[J]. Automation & Instrumentation, 2023, 38(6): 105.
- [2] 刘少义,许恒波,郑宝奎,等.磁浮车用SRIIR160B—2型空气弹簧的计算分析及试验研究[J].铁道车辆,2015,53(4):8.
LIU Shaoyi, XU Hengbo, ZHENG Baokui, et al. Calculation, analysis, testing and research on the SRIIR160B—2 air springs for maglev cars[J]. Rolling Stock, 2015, 53(4): 8.
- [3] 罗英昆,赵春发,梁鑫,等.小半径竖曲线上磁浮车辆空气弹簧动态响应分析[J].振动与冲击,2020,39(17):99.
LUO Yingkun, ZHAO Chunfa, LIANG Xin, et al. Dynamic responses of air-spring suspension of a maglev vehicle negotiating a small-radius vertical curved track[J]. Journal of Vibration and

SHI Xiuxia. Key technologies for unattended train operation signaling system for new generation metro vehicles[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(3): 78.

- [2] 郑伟.全自动无人驾驶模式下系统功能与场景分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(11):107.
ZHENG Wei. Analysis of the function and scene of train operation in full unattended mode[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(11): 107.
- [3] 张艳兵,王道敏,肖衍.城市轨道交通全自动驾驶的发展与思考[J].铁道运输与经济,2015,37(9):70.
ZHANG Yanbing, WANG Daomin, XIAO Yan. Development and thoughts on full-automatic operation of urban rail transit[J]. Railway Transport and Economy, 2015, 37(9): 70.
- [4] 刘鹏翔.城市轨道交通全自动驾驶运营安全分析与列车运行模拟仿真[D].北京:北京交通大学,2017.
LIU Peng'ao. Operational safety analysis and train running simulation of fully automated operation urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [5] 张海涛,梁汝军.地铁列车全自动无人驾驶系统方案[J].城市轨道交通研究,2015,18(5):33.
ZHANG Haitao, LIANG Rujun. Introduction to the unattended train operation system on metro train[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(5): 33.

· 收稿日期:2022-02-18 修回日期:2022-12-12 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-18 Revised:2022-12-12 Published:2024-07-10
· 通信作者:崔杰,高级工程师, jackcj2005@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

Shock, 2020, 39(17): 99.

- [4] 谢钦.新型中低速磁浮车辆空气弹簧应用研究[D].成都:西南交通大学,2017.
XIE Qin. The application research of airsprings for new generation low-speed maglev[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [5] 石军,刘少义,许恒波,等.中低速磁浮列车用新型空气弹簧的研制[J].铁道车辆,2012,50(7):18.
SHI Jun, LIU Shaoyi, XU Hengbo, et al. Development of new type air springs for magnetic levitation trains with middle-low speed[J]. Rolling Stock, 2012, 50(7): 18.

· 收稿日期:2022-01-25 修回日期:2022-02-17 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-25 Revised:2022-02-17 Published:2024-07-10
· 通信作者:刘恒坤,副研究员, m13974984481_1@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license