

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.02.016

磁悬浮系统过轨道错台算法

林科文^{1,2}, 雷思清^{1,3}, 余龙华¹

(1. 国防科学技术大学 磁悬浮技术研究中心, 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 75553 部队, 海南 五指山 572200; 3. 中国人民解放军 91919 部队, 湖北 黄冈 438000)

摘要: 为降低轨道质量和精度, 提高磁浮列车对轨道的抗干扰能力, 以两点悬浮系统为研究对象, 分析过轨道错台和外界干扰引发振动时传感器测得悬浮间隙信号和电磁铁垂向速度信号的变化情况, 提出一种能正确识别轨道错台的方法。根据识别出来的轨道错台信息, 对设定间隙进行相应的补偿。仿真结果表明, 该方法能有效地抑制轨道错台的干扰。

关键词: 轨道错台; 磁浮列车; 两点模型; 设定间隙补偿

中图分类号: O232; TP391.9 **文献标志码:** A

Algorithm on Maglev System Running Across Railway Step

Lin Kewen^{1,2}, Lei Siqing^{1,3}, She Longhua¹

(1. Research Center of Maglev Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. No. 75553 Unit of PLA, Wuzhishan 572200, China; 3. No. 91919 Unit of PLA, Huanggang 438000, China)

Abstract: To reduce quality and precision of railway, and improve the capacity of anti-jamming of maglev train. Basing on the two-point levitation model of single electromagnet module, the signals of the sensors, such as suspension gap and electromagnet vertical speed, can be used to analyze the differences between the vibrations when running across the railway step and arisen by other disturbance; a new method is put forward for identifying the railway step accurately. According to the step railway information, compensate the scheduled gap. Simulation result shows that the algorithm can restrain the disturbance of railway step effectively.

Keywords: step railway; maglev train; two-point model; scheduled gap compensation

0 引言

磁浮线路在相邻支承轨道梁之间延展, 在安装轨道梁时会存在轨道接缝。中低速磁浮线路的轨道接缝一般在 15 mm 左右。由于轨道接缝的存在, 在接缝处可能会出现某些原因造成相邻两个轨道梁之间存在一定程度的高差, 从而产生了轨道台阶。轨道台阶的出现对磁浮列车运行的影响是致命的。

磁浮列车过轨道台阶时影响系统的因素比较多, 引发振动的原因尚不明确, 除了提高轨道铺设精度外, 目前国内未能提出能完全抑制振动的成熟技术。为提高磁浮列车对轨道的抗干扰能力, 为乘客提供一个更加安全舒适的乘坐环境, 并降低轨道质量和精度, 笔者以两点悬浮系统为研究对象, 得出如何正确识别轨道错台信息的方法, 并提出一种能有效抑制轨道错台干扰的控制算法。

1 两点悬浮系统模型

两点悬浮模型如图 1。

两点悬浮系统模块通过防侧滚梁的连接使得模

块的滚动自由度得到抑制, 因此, 在建立两点悬浮系统模型的过程中可以忽略模块绕 x 轴的滚动, 只考虑模块在 oyz 坐标轴内的俯仰和升降运动, 以简化数学模型。其中, M 为簧上车厢质量; m 为簧下单点质量 (包括转向架和电磁铁); a 为电磁铁半段长度; O_c 为簧下刚体质心原点; F_{e1} 、 F_{e2} 为前后点电磁力; z_1 、 z_2 为前后点电磁铁等效位移; i_1 、 i_2 为前后点控制线圈电流; R_1 、 R_2 为前后点磁路磁阻; N 为电磁铁线圈绕组匝数; A 为铁芯极面积; 记常系数 $c = \mu_0 N^2 A / 4$ (μ_0 为空气磁导率)。

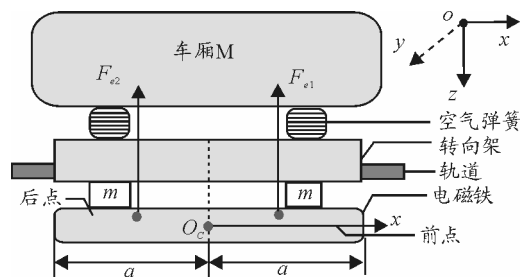


图 1 两点悬浮系统模型

收稿日期: 2010-10-22; 修回日期: 2010-11-22

基金项目: 国家自然科学基金“静浮条件下磁浮列车的轨道弹性耦合振动控制研究(2010-2012)”(60974128); “十一五”国家科技支撑计划“新型导向系统与涡流制动系统研究”

作者简介: 林科文(1985—), 男, 海南人, 硕士, 从事磁悬浮控制研究。

不考虑簧上二次系悬挂系统的影响, 通过推导可得到两点悬浮开环系统数学模型^[1]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2[z_1(t)+z_2(t)]}{dt^2} = (2m+M)g - F_{e1} - F_{e2} \\ \frac{2}{3}m \frac{d^2[z_1(t)-z_2(t)]}{dt^2} = F_{e1} - F_{e2} \\ u_1 = R_1 i_1(t) + \frac{2c}{z_1(t)} \frac{di_1(t)}{dt} - \frac{2ci_1}{[z_1(t)]^2} \frac{dz_1(t)}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2(t) + \frac{2c}{z_2(t)} \frac{di_2(t)}{dt} - \frac{2ci_2}{[z_2(t)]^2} \frac{dz_2(t)}{dt} \\ F_{e1} = c \left[\frac{i_1(t)}{z_1(t)} \right]^2 \\ F_{e2} = c \left[\frac{i_2(t)}{z_2(t)} \right]^2 \end{cases} \quad (1)$$

根据非线性理论中的一次近似定理^[2], 在设定平衡点对模型 (1) 进行线性化, 通过 Hurwitz 稳定性判据^[3], 得出该开环两点悬浮系统是不稳定系统, 需要采取相应的反馈控制策略和方法进行控制, 才能达到稳定悬浮的基本要求。一般采用状态反馈组合方法, 将电流、间隙和加速度 3 种状态加上微分、积分环节进行反馈控制, 可得到一个稳定的闭环系统模型^[4]。下面通过仿真分析两点系统模型 (1) 过轨道错台时间隙传感器和速度信号的变化情况, 提出一种正确识别轨道错台的方法。

2 轨道错台识别方法

磁悬浮系统模型通过安装在电磁铁两端的间隙传感器和加速度传感器测量得到悬浮间隙信号和电磁铁加速度信号, 同时还可以得到电流信号值。当悬浮电磁铁模块在平滑直线轨道上运行, 不受外部干扰的影响下时, 传感器测得悬浮间隙、加速度和电流值都在平衡点附近保持相对稳定。假设在某一时刻突然给电磁铁一个外部冲击力, 电磁铁模块也将会发生振动, 这种振动可称为电磁铁自然振动。为了将电磁铁自然振动和轨道错台引起的振动区分开来, 从这 2 种振动条件下对比传感器间隙和加速度信号的变化, 从而提出正确识别轨道错台的方法。

1) 过轨道错台时传感器间隙和加速度分析

先不考虑接缝的影响, 设有一向上突起、错台高度 $z_g = 2.5 \text{ mm}$ 的轨道错台, 当两点悬浮模块经过该轨道错台时, 电磁铁前后单点会发生振动。此时测量得到传感器间隙和加速度信号变化曲线如图 2。

由图 2 可以看出, 当两点悬浮模块过该设定轨道错台之前, 电磁铁前后单点稳定悬浮在设定悬浮

状态, 经过轨道错台时, 前后点传感器测得悬浮间隙均突然增大, 此时加速度信号突然往 z 轴负方向增大, 即有一个向上变化的加速度, 在传感器间隙尚未回到设定间隙大小之前, 加速度的方向是正负交替的。只有在进入轨道错台一开始时传感器间隙变大, 电磁铁加速度方向向上变化, 即 z 轴负方向。

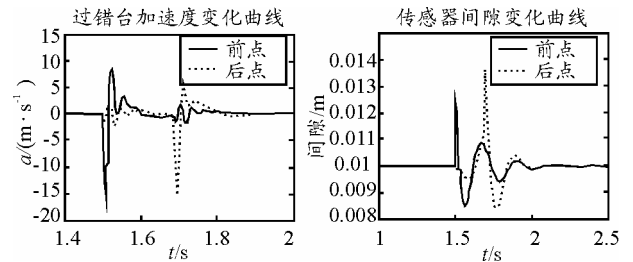


图 2 过轨道错台传感器间隙和加速度信号变化曲线

2) 电磁铁自然振动时传感器间隙和加速度分析

引起电磁铁自然振动的原因有很多, 这里假设电磁铁模块在某时刻突然受到一个方向向下冲击力作用, 使电磁铁模块在该外力作用下发生振动, 设该作用力 $F_d = 20\ 000 \text{ N}$, 方向为 z 轴正方向, 此时得到传感器间隙和加速度变化曲线如图 3。

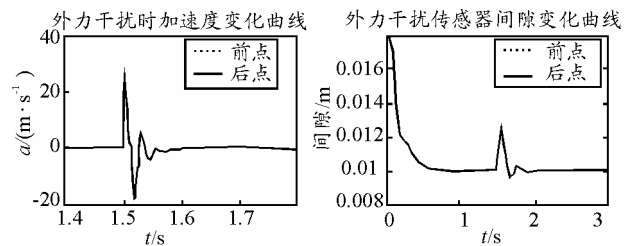


图 3 外力扰动下传感器间隙和加速度信号变化曲线

通过分析可知, 电磁铁突然受到一个向下的作用力将会发生振动, 电磁铁受到一个向下的加速度将会往下掉, 使得传感器间隙变大, 直到最大值后才往上吸起。

对比上述 2 种条件下发生的振动现象可知: 传感器间隙变大时, 电磁铁发生自然振动, 则电磁铁加速度是向下增大的, 也就是电磁铁有往下掉的趋势, 而在经过轨道错台时电磁铁加速度是向上增大的, 电磁铁有往上抬的趋势。

考虑到加速度的方向变化比较快以及到了一定程度会出现传感器间隙变大, 加速度方向不一致的可能, 而速度信号的方向变化能更好地反映出电磁铁的振动方向, 下面将电磁铁的垂向速度信号代替加速度信号进行分析。这里不考虑轨道耦合振动的影响, 电磁铁垂向速度信号的获取则采用加速即

度信号一次积分的方法, $v = \int a dt$ 。在上述 2 种设定条件下得到电磁铁垂向速度信号变化如图 4。

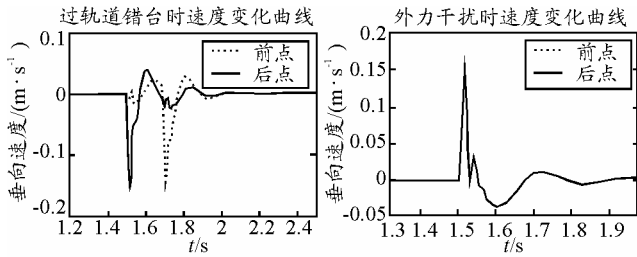


图 4 过轨道错台和外力干扰下速度信号变化曲线

从图 4 可以看出, 垂向速度信号变化能及时地反映出电磁铁的振动方向。结合上面分析的传感器间隙变化和垂向速度信号变化, 不考虑车轨耦合振动的影响, 可以得出正确判断轨道错台出现的方法:

- 1) 当传感器间隙信号突然增大, 垂向速度信号也突然向上增大, 即 z 轴负方向增大, 则表示悬浮系统受到一个向上突起轨道错台的影响。
- 2) 当传感器间隙信号突然增大, 垂向速度信号突然向下增大, 即 z 轴正方向增大, 则表示悬浮系统是受到外界干扰的影响引发的自然振动。
- 3) 当传感器间隙信号突然减小, 垂向速度信号也突然向下增大, 即 z 轴正方向增大, 则表示悬浮系统受到一个向下凹陷轨道错台的影响。
- 4) 当传感器间隙信号突然减小, 垂向速度信号突然向上增大, 即 z 轴负方向增大, 则表示悬浮系统是受到外界干扰的影响引发的自然振动。

以上方法可以区别出轨道错台和外界干扰引发的振动, 从而可根据相应的振动原因采取对应的控制算法, 达到抑制轨道错台和外界干扰的目的。轨道错台的出现时机可以通过上述方法得到, 即间隙传感器信号和垂向速度信号突变的时刻为轨道错台出现的时间。轨道错台的高度可以通过对传感器间隙信号的进一步分析得到。

上述轨道错台出现的时机判断方法没有考虑轨道接缝存在的影响, 但实际轨道线路上轨道接缝的出现是不可避免的, 轨道接缝的存在不影响轨道错台出现时机的判断, 但对轨道错台高度的判断有一定的影响, 因为实际系统的传感器间隙过轨道错台时不是突变到错台高度的, 与接缝宽度有一定的关系。在试验平台上测得直径约为 4.5 cm, 探头间距离为 4.5 cm 的间隙传感器过接缝宽度为 2 mm、高度约为 5 mm 的轨道错台时, 间隙传感器两探头通道实测得到的悬浮间隙变化曲线如图 5。间隙传感器探头在接缝处检测到的悬浮间隙增大了 6 mm,

而后进入错台, 检测到悬浮间隙在轨道错台增大了 5 mm, 正是轨道错台的高度。

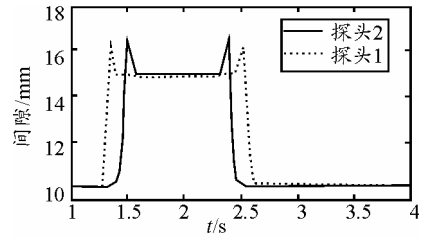


图 5 间隙传感器过轨道错台实测悬浮间隙

因此, 根据前面假设的条件得到过接缝的时间

$$t_{\text{delay}} = (jf + d) / v \tag{2}$$

其中, jf 为接缝宽度, d 为传感器探头直径, v 为电磁铁运行速度。则错台高度的突变值可通过当前的传感器间隙采样值和 t_{delay} 时刻前的传感器间隙值计算得到, 即:

$$z_g = z_s - z_{s\text{delay}} \tag{3}$$

其中: z_s 为当前时刻传感器间隙采样值, $z_{s\text{delay}}$ 为 t_{delay} 时刻前传感器间隙采样值。

因为实际中轨道接缝的宽度是不确定的, 所以用于该式计算的接缝宽度 jf 是一个近似平均值, 故而该方法得到的错台高度值是一个轨道错台高度的近似值。综上所述, 通过以上方法可以正确识别出轨道错台出现的时机和高度, 为下面算法研究提供依据。

3 算法研究与仿真分析

为了利用所识别出来的轨道错台信息进行悬浮控制, 使得两点悬浮模型能够平稳地通过轨道错台, 这里将根据轨道错台信息提出一种设定间隙补偿的控制算法。

设定间隙补偿算法就是当两点悬浮模块过轨道错台时, 根据轨道错台的信息, 在原设定间隙的基础上适当地补偿轨道错台高度, 使得悬浮模块适时地跟踪补偿后的设定悬浮间隙, 达到两点悬浮模型能够平稳通过轨道错台的算法。

根据以上目标, 当两点悬浮模型经过向上突起轨道错台时, 传感器测得悬浮间隙增大了轨道错台高度 z_g , 即传感器间隙 $z_s = z_g + z_{s0}$ 。假如按照设定间隙 z_{s0} 保持不变, 则此刻的反馈环节间隙误差很大, 在控制环节的作用下将增大电流使得电磁铁往上吸。为防止过轨道错台时悬浮间隙误差变化过大, 将设定间隙调整至 $z'_{s0} = z_g + z_{s0}$, 这样悬浮系统就在

该设定间隙 z'_{s0} 下通过轨道错台, 从而能够保证悬浮系统不跟踪轨道错台的阶跃干扰。这样, 两点悬浮系统模型就能顺利通过向上突起轨道错台。根据以上分析, 可以得出增加设定间隙补偿算法后闭环系统控制框图如图 6。

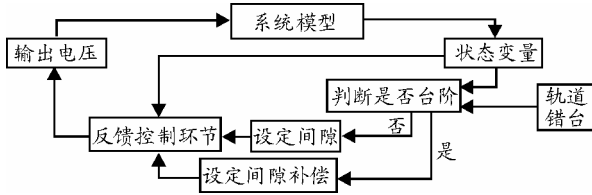


图 6 设定间隙补偿算法框图

当两点悬浮模块经过高度为 z_g 的轨道错台时, 传感器开始检测到接缝的时间为 t_0 , 则设定间隙补偿算法得到的新设定间隙 z'_{s0} 可表述为:

$$z'_{s0} = \begin{cases} z_{s0}, & t < t_0 \\ z_{s0} + z_{gd}(t), & t_0 \leq t < t_0 + jf/v \\ z_{s0} + z_g, & t_0 + jf/v \leq t \end{cases} \quad (4)$$

其中, $z_{gd}(t)$ 是为设定间隙安排的过渡过程, 目的是缓和设定间隙发生突变, 防止在过接缝时实测间隙和设定间隙之间的误差过大导致控制量过大。根据安排过渡过程理论^[5], $T = jf/v$ 为过渡时间。则可为两点悬浮系统设定间隙安排过渡过程:

$$z_{gd}(t) = \begin{cases} 2\frac{z_g}{T^2}t^2, & t_0 < t \leq \frac{T}{2} + t_0 \\ z_g(4\frac{t}{T} - 2\frac{t^2}{T^2} - 1), & \frac{T}{2} + t_0 < t \leq T + t_0 \\ z_g, & t > T + t_0 \end{cases} \quad (5)$$

假设两点悬浮模型经过以向上突起的轨道错台, 电磁铁的运行速度 $v = 50 \text{ km/h}$, 设定间隙补偿中过接缝时间 $T = jf/v \approx 0.0007 \text{ s}$, 轨道错台高度 $z_g = 2.5 \text{ mm}$ 。则可得轨道错台和设定间隙补偿曲线如图 7。

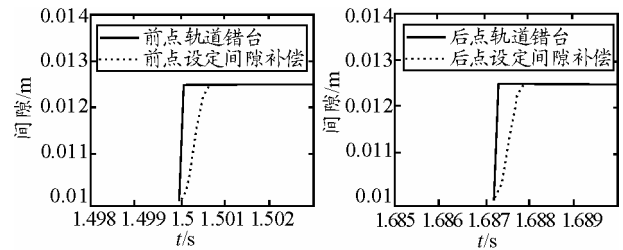


图 7 轨道错台和设定间隙补偿曲线

假设初始设定间隙 $z_{s0} = 10 \text{ mm}$, 采用了设定间隙补偿算法以后, 电磁铁经过轨道错台以后悬浮系统新的平衡点为 $z'_{s0} = 12.5 \text{ mm}$, 即电磁铁过了轨道错台后将以该悬浮间隙运行。对比增加设定间隙补偿算法前后两点悬浮系统过轨道错台的悬浮动态特性, 得到的结果如图 8。

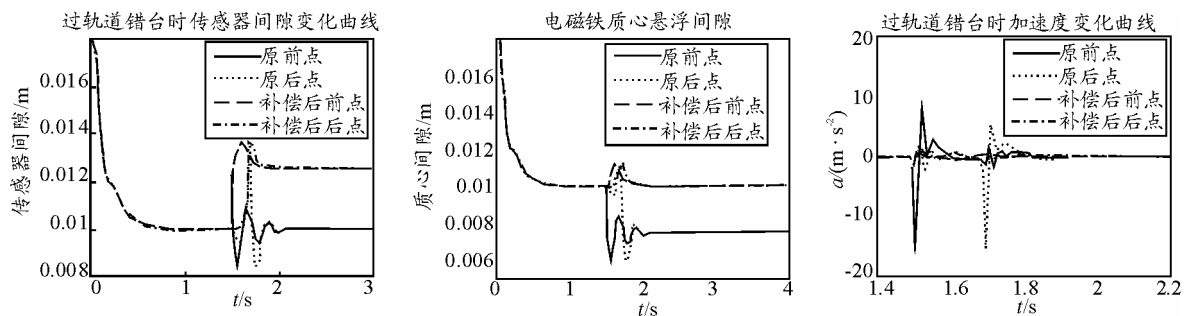


图 8 设定间隙补偿算法仿真曲线

由图 8 给出的两点悬浮系统过轨道错台时前后点传感器间隙变化曲线、前后点电磁铁质心悬浮间隙变化曲线和前后点加速度变化曲线可以看出:

1) 增加设定间隙算法前。传感器间隙检测到 2.5 mm 高的轨道错台, 而后在平衡点附近上下振荡并逐渐衰减, 后点进入轨道错台时检测到的悬浮间隙约为 14 mm 。该过程电磁铁质心悬浮间隙也经过上下波动后相对于原绝对坐标变化了 2.5 mm , 电磁铁加速度最大波动范围约为 $-15 \sim 8 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2) 增加设定间隙算法后。当前点经过轨道错台

时, 传感器间隙检测到 2.5 mm 高的轨道错台, 控制算法切换进入设定间隙补偿, 使得悬浮间隙误差变化没有发生突变, 这样电磁力也不会突然变大。但是此刻前点的实际悬浮间隙并没有达到 12.5 mm 的设定补偿间隙, 根据电磁力的计算公式可知, 电流不变, 而实际悬浮间隙随着前点电磁铁进入轨道错台从设定间隙 10 mm 逐渐增大, 直到整个前点电磁铁经过轨道错台等效间隙才增大到 12.5 mm , 这一过程使得电磁力变小, 电磁铁往下掉, 悬浮间隙变大。该过程中电磁铁质心悬浮间隙最大波动幅度仅为

1.2 mm 左右，相比较于未增加设定间隙补偿时的最大波动值 4 mm，电磁铁加速度变化范围为 $-1.5 \sim 1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ ，同样减小到 1/10。因此，从仿真结果可以看出，设定间隙补偿算法对过轨道错台问题起到很好的抑制作用。

4 结束语

文中以两点悬浮系统模型为平台，对比了悬浮系统过轨道错台和外界干扰引发振动时传感器间隙和速度信号的不同，提出了能够正确识别轨道错台的方法，基于该轨道信息提出的设定间隙补偿算法

(上接第 32 页)

```

N0000 M00          ; 暂停
N0010 M03 S800     ; 开启主轴
N0020 M08          ; 开启冷却
N0030 G90 G92 X0 Y0 Z0 ; 建立坐标系
N0040 M98 P1000    ; 调用子程序
N0050 M02          ; 结束
N1000 G90          ; 子程序开始
N1010 G01 Y-1 F1000 ; Y 向进刀
N1020 G01 X-2 F500 ; X 向进刀磨削
N1030 G04 P0.3     ; 暂停 0.3 秒
N1040 G01 X-2.5 F500 ; X 向进刀磨削
N1050 G04 P0.3     ; 暂停 0.3 秒
N1060 G01 X-3 F500 ; X 向进刀磨削
N1070 M99          ; 子程序返回

```

程序的格式和语法满足 SKX4-F 数控系统的要求。根据工艺需要，可在编程表格中输入表 2 中列举的任何工艺代号，可单个输入，也可根据实际组

(上接第 46 页)

而经过训练后的方位仰角偏差信号方差为 2.856×10^{-5} ，已经比期望输出的方差要小，完全可以满足着舰精度需求。经过反复验证，所训练的网络能够很好的融合 2 个着舰系统的方位仰角偏差信号，取得较高精度的融合结果。

表 1 训练效果比较

各对比信号	均值/°	方差
OLS 方位仰角偏差信号	-0.001 1	2.978 0e-5
ACLS 方位仰角偏差信号	-0.001 1	9.260 6e-5
期望输出方位仰角偏差信号	-0.001 1	2.866 6e-5
训练前 BP 网络输出信号	-0.022 0	17.116e-5
训练后 BP 网络输出信号	-0.001 1	2.856 2e-5

3 结论

该方法利用一种可以有效提高方位仰角偏差信

能够有效地抑制轨道错台干扰。

参考文献:

- [1] 林科文, 余龙华. 磁悬浮列车过轨道台阶问题研究[J]. 兵工自动化, 2010, 29(10): 56-59.
- [2] 曹建福, 韩崇昭, 方洋旺. 非线性系统理论及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [4] 周富民. 考虑轨道若干因素的悬浮控制研究[D]. 长沙: 国防科技大学工学硕士论文, 2009.
- [5] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

合输入，由于组合方式很多，程序量很大，这里就不列举了。这样，无须手动编写 G 代码程序便可得到需要的加工程序。

4 结束语

该方法实现了钻头端齿的数控加工和参数化编程，现已成功应用于工具磨床数控系统，实现了万能工具磨床的数控化改造。利用该方法加工出来的产品质量高、一致性好，生产效率高。

参考文献:

- [1] 圣维 SKX4-F 数控系统操作说明. 四川: 绵阳圣维数控有限责任公司, 2005.
- [2] 圣维 SKX4-F 数控系统编程手册. 四川: 绵阳圣维数控有限责任公司, 2005.
- [3] 陈兴武. 应用 SINUMERIK 802D 数控系统开发工具磨床的研究[J]. 福建工程学院学报, 2003, 1(3).
- [4] 景富军. 西门子 802C baseline 数控系统应用[J]. 兵工自动化, 2009(9): 76-77.
- [5] 董明玉. 加工中心的改造[J]. 兵工自动化, 2009(2): 74-75.

号精度的 BP 神经网络结构和神经元传递函数，取得了比较理想的结果，为舰载机着舰导航信息的精确性和着舰过程的可靠性提供了技术支持。同时，对光学助降系统灯光偏差信号的量化建模研究，也可作为后续研究探讨的参考。

参考文献:

- [1] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 9.
- [2] 沈飞, 郭军. 基于 BP 神经网络的数据融合方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2005, 121(5): 63-65.
- [3] 朱晓娟. 飞行控制系统多传感器信息融合技术研究[D]. 南京航空航天大学研究生院自动化学院, 2008.
- [4] 董长虹. MATLAB 神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 64-71.