

文章编号 1004-924X(2015)增-0355-06

考虑多种误差影响的数控机床载荷谱编制

陈传海*, 杨兆军, 孟广伟, 田海龙, 李洪洲
(吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:提出了考虑多工况、多影响因素的数控机床载荷谱编制方法,以便实现数控机床的可靠性概率设计,从本质上提高数控机床的可靠性。首先,以机床每次切削时的切削长度与进给量的比值作为载荷循环次数,载荷循环次数与所有载荷循环次数总和的比值作为相对循环次数,机床工作载荷与额定载荷的比值作为相对载荷;采用统计分析方法,建立了以载荷相对循环次数为自变量、相对载荷为因变量的载荷分布函数。然后,针对样本载荷数据服从多个分布函数的情况,提出以多种误差信息为评价因素,采用数据包络分析方法评价得出载荷最优分布模型的载荷谱编制方法。应用表明:所述方法可以建立准确的数控机床载荷谱,试验所跟踪数控机床的载荷服从 $\alpha=0.37, \beta=0.53$ 的伽玛分布函数。结果表明所建立的载荷谱可以满足数控机床的可靠性概率设计要求。

关键词:数控机床;机床;载荷谱;数据包络分析;可靠性

中图分类号: TG659 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0355

Load spectra of NC machine tools considering multiple influence factors

CHEN Chuan-hai*, YANG Zhao-jun, MENG Guang-wei, TIAN Hai-long, LI Hong-zhou

(School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: cchchina@foxmail.com

Abstract: A method to establish the representative load spectrum for probability-reliability design of Numerical Control (NC) machine tools was proposed by considering multiple working conditions and multiple influence factors to improve its reliability essentially. Firstly, the ratio of feeding length to feed speed was set as fatigue loading cycles, the ratio of loading cycles to total loading cycles was set as relative loading cycles, and the ratio of working load to the specified load of machine tools as relative load. Then, the load distribution function of a relative load vs. relative loading cycles was established using statistical analysis. In view of the situation that the load data obeyed different distribution functions, a data envelopment analysis method in which multiple error information was taken as evaluation factors was proposed to determine the best distribution model. The application results show that load spectrum of NC machine tools can be accurately established using this method. The load data of tested NC machine tools follow the gamma distribution with $\alpha=0.37$ and $\beta=0.53$. The load spectrum

收稿日期: 2015-04-15; **修订日期:** 2015-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51505186); 吉林省科技发展计划特色产业基地建设资助项目 (No. 20130302009GX); 中国博士后科学基金 (No. 2015M580244); 吉林省教育厅科学研究规划 (吉教科合字 [2015]472 号)

meets the requirements of probability-reliability design of NC machine tools.

Key words: Numerical Control Machine; machine tool; load spectrum; Data Envelopment Analysis (DEA); reliability

1 引言

数控机床作为组成和装备现代制造系统的物质和技术基础,是具有高科技含量的“工作母机”。虽然目前国内研发的数控机床在精度、速度、大型化、多轴联动和功能复合化等方面与国外相比差距已经越来越小,但在可靠性方面差距依然较大,尤其是采用国产功能部件的数控机床,其可靠性差距更为明显^[1-3]。数控机床为机、电、液、气一体的复杂系统,目前针对复杂机电系统的可靠性设计理论还不成熟,因此要提高数控机床可靠性水平只能从其关键件的可靠性概率设计上做起。研究表明,国产数控机床无法实现关键件的可靠性概率设计的主要原因就是缺乏具有代表性和典型性的数控机床载荷谱^[4]。

切削载荷是编制载荷谱的基础,国内外专家学者针对切削载荷的获取方法进行了研究。前苏联卡洛乌尼斯教授通过编制专门的计算机仿真程序,在规定的工艺参数下模拟机床相关运动部件的动作,预测了机床的承载能力和受载情况^[5]。德国卡尔斯鲁厄大学的制造科学研究所(WBK),以 Jürgen Fleischer 教授为代表的研究团队一直致力于数控机床可靠性技术的研究。为获得数控机床载荷,采用多体动力学仿真技术对机床的运动进行了虚拟仿真,获得了机床的虚拟载荷谱,建立了考虑载荷影响的数控机床可靠性评估模型。在此基础上,提出了根据实际载荷谱对机床关键部件进行动态优化的预防性维修策略,提高了数控机床的可用性^[6]。

国内原吉林工业大学(现已并至吉林大学)申桂香、朱振民和王义强等人于 20 世纪 90 年代,在中国第一汽车制造厂收集得到了 CA6140 车床的切削载荷数据,并对数据进行了整理分析,建立了主轴、中间轴、输入轴的静态载荷谱^[7]。然而随着数控技术地不断发展,直驱技术逐渐代替了传统的齿轮和皮带传动,简化了机床的结构。同时,机

床的功能也发生了较大变化,普遍具有高速和高精等特点,因此机床的载荷规律也必然发生了很大变化。90 年代的载荷谱已经不能适应当前数控机床的发展。

为适应当前数控机床的发展,根据其工作特点,本文对数控机床载荷谱的编制方法进行了研究。以机床每次切削时的切削长度与进给量的比值作为载荷循环次数,切削载荷与机床的最大切削载荷的比值作为相对切削载荷,相对切削载荷所对应的循环次数与所有载荷循环次数总和的比值为相对循环次数,进而建立相对切削载荷与相对循环次数的载荷分布函数。针对载荷数据服从多个分布的情况,提出以多种误差信息为评价因素,并采用数据包络分析方法评价出了载荷的最优分布模型。

2 数据包络分析模型

数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)是著名运筹学家 A. Charnes 和 W. W. Cooper 等以“相对效率”为基础,处理多个输入、输出的多目标决策问题的系统分析方法,是运用线性规划模型计算和比较决策单元(Decision Making Unit, DMU)之间的相对效率,以此对评价对象做出评价^[8]。

假设 DMU 的输入和输出向量分别表示为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 、 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_s)^T$,则可用 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) 表示 DMU 的生产活动。 n 个 DMU _{j} 对应的输入和输出向量分别为^[8,9]:

$$\mathbf{x}_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T > 0, x_{ij} > 0$$

$$\mathbf{y}_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj})^T > 0, y_{rj} > 0$$

j 为第 j 个评价单元, $j = 1, 2, \dots, n$; m 为评价单元输入影响因素的个数; s 为评价单元输出影响因素的个数; $i = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, s$ 。

为此,每个 DMU _{i} 的效率评价指数 R_0 为:

$$\max R_0 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}}, \quad (1)$$

$$s. t. \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n$$

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T \geq 0$$

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_s)^T \geq 0$$

对式(1)进行 Charnes-Cooper 等价变换^[10], 则:

$$\max R_0 = u^T y_0, \quad (2)$$

$$s. t. v^T x_j - u^T y_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$$

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T \geq 0$$

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_s)^T \geq 0$$

如存在 u, v 满足上式,使得 $R_0=1$,则 DMU₀ 为 DEA 有效,从而可对决策单元进行选择。

根据数据包络分析评价方法,可得到综合评价函数:

$$R_i = \sum_{j=1}^n \omega_j r_{ij}; j = 1, 2, \dots, 6; n = 1, 2, \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为分布函数的评价因素; ω_j 为第 j 个因素的权重:

$$1 \leq \frac{\max\{\omega_1, \dots, \omega_m\}}{\min\{\omega_1, \dots, \omega_m\}} \leq 9, \quad (4)$$

为此, $\omega_j - 9\omega_k \leq 0, j, k = 1, \dots, m, k \neq j$, 所以式(3)和(4)等价于:

$$\begin{cases} R_i = \sum_{j=1}^n \omega_j r_{ij} \leq 1 \\ \omega_j - \omega_k \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

DEA 值越接近于 1,则评价单元的效率值越高。评价单元的效率值越大,则表明该分布函数的误差越大。因此,最优分布对应的效率值应为最小。

对上述数据包络分析评价方法的输入量进行包络分析,可用如表 1 的评价因素值进行各分布函数误差的描述。

表 1 评价因素值

Tab. 1 Evaluation factor

伽玛分布	贝塔分布	正态分布	威布尔分布
r_{11}	r_{21}	...	r_{i1}
r_{12}	r_{22}	...	r_{i2}
...
r_{1j}	r_{2j}	...	r_{ij}

3 数控机床载荷谱编制方法

3.1 载荷计数

载荷的循环计数是编制载荷谱的关键,目前主要采用雨流计数法计及载荷的循环次数。利用载荷测试系统直接测量得到的工程机械、汽车和航空航天产品的载荷数据,在时间和幅值上都是连续的,具有多个峰值和谷值,而利用切削力经验公式计算得到的恒定工况下的数控机床切削力是恒定的,因此不同工况下的载荷呈现间断、跳跃状态,没有峰值和谷值。因此雨流计数法无法对数控机床的切削力进行幅值和均值进行循环计数。

为此,在编制数控机床载荷谱时假设:

(1)采用切削力经验公式计算得到的切削力为恒定值(切削工艺参数不变的情况下),无法用二维分布函数(幅值和均值)进行描述。为此,在编制数控机床载荷谱时只考虑切削力的均值。

(2)根据疲劳损伤累积假说,假定单位进给量为一个完整的载荷循环,即单位进给量记为 1 次载荷循环。

根据上述假设,切削力对应的载荷循环次数为:

$$N_i = \frac{L_i}{f_i}, \quad (6)$$

式中: L_i 为机床第 i 次切削时的切削长度,单位为 mm; f_i 为机床第 i 次切削时的机床进给量,单位为 mm/r。

因此,切削力 F_j 的总循环次数为:

$$N_j = \sum \frac{L_i}{f_i}. \quad (7)$$

载荷谱为载荷的时间历程,因此,为了使编制的载荷谱更具有代表性,以相对载荷和相对载荷循环次数为变量对数控机床的载荷进行描述,为此,数控机床的载荷分布函数可表示为:

$$x_i = \frac{F}{F_{\max}} \text{ 或 } \frac{T}{T_{\text{额}}}, 0 \leq x_i \leq 1, \quad (8)$$

$$f(x_i) = \frac{N_j}{\sum N_j}, 0 \leq f(x_i) \leq 1. \quad (9)$$

3.2 载荷分布模型的建立

前苏联学者采用实际切削试验方法测量得到了普通机床的载荷,并对其进行了统计处理,分析

得出:机床承受重载占多时,载荷服从贝塔分布;中载占多时,载荷服从正态分布;轻载占多时,载荷服从伽玛分布。然而随着计算机技术和信息技术的发展,机床的结构发生了较大改变,导致数控机床的载荷谱与普通机床有较大的不同。为了建立具有代表性和典型性的载荷谱,分别用贝塔分布函数、正态分布函数、伽马分布函数和威布尔分布函数对载荷数据进行拟合,并通过数据包络分析方法评价出切削力的最优模型。

根据数据包络分析的思想 and 原理^[11],将贝塔分布函数、正态分布函数、伽马分布函数和威布尔分布函数作为载荷谱的评价单元。数据包络分析模型的输入量为:

(1)拟合分布函数与样本累积分布函数的最大误差,即:

$$r_{11} = \max\{|F_0(x_i) - F(x_i)|\}. \quad (10)$$

(2)拟合分布函数与样本累积分布函数的平均误差,即:

$$r_{12} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|F_0(x_i) - F(x_i)|). \quad (11)$$

(3)拟合分布函数与样本累积分布函数的累积误差的均方差,即:

$$r_{13} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_0(x_i) - F(x_i))^2}. \quad (12)$$

(4)拟合分布函数与样本累积分布函数的正、负残差的最大值,即:

$$r_{14} = \left| \max_{1 \leq i \leq n} (F_0(x_i) - F(x_i)) \right| - \left| \min_{1 \leq i \leq n} (F_0(x_i) - F(x_i)) \right|. \quad (13)$$

(5)拟合概率密度函数与样本概率密度函数的累积误差,即:

$$r_{15} = \frac{1}{n} (|f_0(x_i) - f(x_i)|). \quad (14)$$

(6)拟合概率密度函数与样本概率密度函数的均方差,即:

$$r_{16} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_0(x_i) - f(x_i))^2}. \quad (15)$$

4 案例应用

4.1 数控机床载荷数据

切削工艺参数是现场载荷试验的第一手资

料,是数控机床载荷谱建立的基础数据。吉林大学数控机床可靠性技术研究团队根据数控机床载荷数据的获取方法和流程,在数控机床的典型用户处(典型用户企业如表 2 所示),开展了数控机床的现场载荷试验^[12],收集了大量的载荷信息。

表 2 现场载荷试验的数控机床型号和试验周期

Tab. 2 Type of machine tools and periodic time of field test

机床编号	试验阶段	机床用户
08002	2010.6~2012.1	兰州机床厂
26002	2012.3~2012.7	某发动机厂
26003	2012.3~2012.7	某发动机厂
27006	2012.3~2012.7	某发动机厂
27007	2012.3~2012.7	某发动机厂
29001	2012.3~2012.7	某发动机厂
29002	2012.3~2012.7	某发动机厂
31001	2012.3~2012.7	某发动机厂
32009	2012.3~2012.7	某发动机厂
33002	2012.3~2012.7	某发动机厂
33001	2012.3~2012.7	某发动机厂
34001	2012.3~2012.7	某发动机厂
DLH-20	2012.8~2013.3	某航天制造厂
DLH-32	2012.8~2013.3	某航天制造厂
HDBS-63	2012.8~2012.11	某航天制造厂
HDM-80	2012.8~2012.11	某航天制造厂
VDM-75	2012.8~2013.3	某航天制造厂
DLMH-16	2012.11~2013.3	某航天制造厂
DLMH-20	2012.11~2013.3	某航天制造厂
ADG35M	2011.9~2012.3	常州亚兴数控设备有限公司
CK7516GS	2011.7~2012.3	烟台海德机床有限公司

4.2 载荷谱建立

利用 Matlab 软件,采用模拟退火优化方法,计算得到了威布尔分布、对数正态分布、伽玛分布和贝塔分布函数的参数估计值。为了对回归方程进行检验,检验统计量为:

$$F = \frac{(n-m-1) \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y)^2}{(m \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2)}. \quad (16)$$

如果 $F \geq F_{\alpha}(m, n-m-1)$,则认为在显著性水平 α 下呈线性关系。通过计算得到了 4 种分布的 F 值和 $F_{0.05}$,相关参数如表 3。

表 3 分布函数参数估计

Tab. 3 Parameter estimation of distribution function

威布尔分布	对数正态分布	伽玛分布	贝塔分布
m	0.56	μ	-2.65
η	0.13	σ	0.31
D	0.86	D	0.31
		α	0.37
		β	0.53
		D	0.11
		D	0.15
		$D_{10,0.95}=0.19$	

由表 3 可以看出,威布尔分布函数和对数正态分布函数没有通过柯尔莫哥洛夫假设检验,而伽玛分布函数和贝塔分布函数通过了假设检验,即该批载荷数据在置信水平 α 下既服从伽马分布函数又服从贝塔分布函数。为了得到最优的载荷

表 4 评价因素值

Tab. 4 Evaluation factors of Gamma and Beta distributions

伽玛分布	评价因素值	贝塔分布	评价因素值
r_{11}	0.113 8	r_{21}	0.149 9
r_{12}	0.039 3	r_{22}	0.052 5
r_{13}	0.007 0	r_{23}	0.009 6
r_{14}	0.112 2	r_{24}	0.149 9
r_{15}	0.652 9	r_{25}	0.641 6
r_{16}	0.143 0	r_{26}	0.155 3

参考文献:

- [1] 杨兆军,陈传海,陈菲,等. 数控机床可靠性技术的研究进展[J]. 机械工程学报,2013,20:130-139.
YANG ZH J, CHEN CH H, CHEN F, et al.. Progress in the research of reliability technology of machine tools[J]. *Chinese Journal of Mechanical*, 2013,20:130-139. (in Chinese)
- [2] 张景和,张顺国,赵海潇,等. 大型超精密机床导轨卸荷系统结构与测试[J]. 光学精密工程, 2007,(9):1383-1390.
ZHANG J H, ZHANG SH G, ZHAO H X, et al.. Structure design and test for guide unloading system of large ultra-precision machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,(9):1383-1390. (in Chinese)
- [3] 陈传海,杨兆军,陈菲,等. 基于 Bootstrap-Bayes 的加工中心主轴可靠性建模 [J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(1):95-100.

分布,采用数据包络分析评价方法进行分析。利用式(5)得到综合评价因素如表 4 所示。

经计算 $R_r < R_\beta$, 因此,现场跟踪数控机床的载荷谱为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.58^{0.37} \Gamma(0.37)} x^{0.63} e^{-x/0.58}, & x > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (17)$$

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{0.58^{0.37} \Gamma(0.37)} x^{0.63} e^{-\frac{x}{0.58}} dx. \quad (18)$$

5 结 论

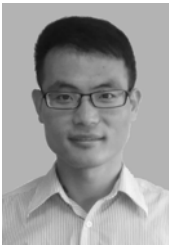
针对数控机床载荷谱通过多个拟合分布假设检验的问题,提出以多种误差信息为评价因素,采用数据包络分析方法评价分布的拟合综合误差,该方法避免了主观评价带来的影响,可选出载荷数据的最优模型。

实例分析得到了试验跟踪数控机床的载荷服从 $\alpha=0.37, \beta=0.53$ 的伽玛分布函数。通过研究数控机床的载荷谱编制技术,得到了一套适用于数控机床的载荷谱编制方法。

- CHEN CH H, YANG ZH J, CHEN F, et al.. Reliability modeling of machining center spindle based on Boosttrap-Bayes [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44 (1):95-100. (in Chinese)
- [4] WANG Y Q, JIA Y ZH, YU J Y, et al.. Failure probabilistic model of CNC lathe [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1999, 65: 307-314.
- [5] Д Н. Колониус. Прогнози рование нагруж енностис танков [J]. *Станки и инструмент*, 1991, 5: 10-12.
- [6] FLEISCHER J, WIESER J, SCHOPP M, et al.. Availability increase of machine tools through adapted maintenance activities and assembly-specific maintenance intervals [C]. *15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering: Conference Proceedings*, 2008, 388-393.
- [7] WANG Y Q, SHEN G X, JIA Y Z. Multidimensional force spectra of CNC machine tools and their

- applications, part one: force spectra [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 25: 1037-1046.
- [8] NICOLE A, LEA F, ZILLA S. Review of ranking methods in the data envelopment analysis context [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 140: 249-265.
- [9] 陈传海, 杨兆军, 陈菲, 等. 基于数据包络分析的数控机床故障模式分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(6): 1523-1528.
CHEN CH H, YANG ZH J, CHEN F, *et al.*. Failure mode analysis of computer numerical control machine tools based on fuzzy-DEA[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(6): 1523-1528. (in Chinese)
- [10] CHARNES A, COOPER W W. Programming with fractional function [J]. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1962, 9: 181-185.
- [11] WADE D C, LARRY M S. Data envelopment analysis (DEA) -Thirty years on[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 192: 1-17.
- [12] YANG ZH J, CHEN CH H, CHEN F, *et al.*. Reliability analysis of machining center based on the field data [J]. *Maintenance and Reliability*, 2013, 15(2): 147-155.

作者简介:



陈传海(1983—),男,山东烟台人,博士后,讲师,2013年于吉林大学获得博士学位,主要从事数控机床载荷谱技术方面的研究。E-mail: cchchina@foxmail.com



杨兆军(1956—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1982年于吉林工业大学获得学士学位,1995年于吉林工业大学获得博士学位,主要从事数控装备可靠性理论与技术、复杂曲面成形理论与数控制造装备方面的研究。E-mail: yzj@jlu.edu.cn