主軸系統靜剛性與自然頻率分析

趙金生、紀華偉

E-mail: 9125610@mail.dyu.edu.tw

摘 要

金屬切削用工具機主軸，必須滿足使用上的功能需求，軸承型式、跨距、預壓及拉刀力的設定，都會 影響主軸的動、靜態性能，這些因素間的複雜關係是急待釐清的課題。軸承是主軸的關鍵零件之一，主 軸設計者必須選擇適當的參數。很明顯的，較高的軸承預壓可以提高剛性，但會限制主軸的最高轉速； 而較低的預壓量卻會導致主軸軸鼻端的嚴重變形，甚至在加工中產生振動及噪音。針對二軸承支撐主軸 的最佳跨距有許多研究，雖然現代的主軸構造不只有二個軸承，有的研究者提出在分析主軸靜剛性時可 以將其簡化為二軸承系統，但我們如何確定這種簡化模型的適用性? 本研究的目的是希望分辨真實主軸與簡化模型間的差異，具有四個角接觸滾珠軸承的主軸，是本文的 研究標的。在不同直徑的7/24刀把，與不同大小的拉刀力設定條件下，測試主軸的靜剛性，並利用套裝 的有限元素分析軟體－"I-DEAS"，建構主軸的有限元素模型，在不同的邊界條件下，模擬主軸的靜態與 動態特性，比較實驗數據及模擬結果，以確定有限元素模型的正確性。同時本文發現，簡化模型的主要 弱點，是未考慮主軸襯套的變形量。希望本研究的結論，能對提升工具機業的主軸設計能力有所助益。

關鍵詞 : 工具機，主軸，靜剛性，動態特性，角接觸滾珠軸承，7/24刀把，有限元素

目錄

第一章 序論--P1 1.1 前言--P1 1.2 研究動機--P3 1.3 文獻回顧--P5 1.4 研究方法與內容--P12 第二章　主軸的構造與靜剛性試驗--P13 2.1 主軸的構造--P13 2.2 斜角滾珠軸承的特性--P14 2.2.1 軸承的接觸角--P15 2.2.2 軸承的排列方式--P17 2.2.3 軸承的預壓--P17 2.2.4 軸承的潤滑方式--P19 2.2.5 軸承的靜剛性特性--P20 2.2.6 軸承的靜剛性值--P25 2.3 軸-軸承系統的靜剛性--P33 2.4 7/24刀把介面靜剛性--P39 2.4.1 主軸拉刀力設定對軸-刀把介面剛性的影響--P42 2.4.2 製造公差對軸-刀把介面剛性的影響--P44 2.5 主軸系統靜剛性試驗架構--P48 第三章 主軸系統脈衝試驗與分析--P55 3.1 脈衝試驗(IMPULSE TESTING)--P56 3.1.1 衝擊槌與脈衝輸入訊號--P58 3.1.2 加速規的安裝方式--P62 3.1.3 訊號處理與訊號品質確認--P64 3.2 實驗設備與架構--P67 第四章 主軸有限元素模型--P73 4.1 主軸有限元素模型靜剛性分析--P73 4.1.1 選用元素種類與收斂性--P74 4.1.2 主軸靜剛性模型的建構與分析--P77 4.1.3 錯估軸承靜剛性的原因--P92 4.2 襯套變形量的影響--P94 4.3 軸承剛性及跨距對主軸靜剛性的影響--P97 4.4 自然頻率分析--P100 第五章 結論--P103 參考文獻--P105 附錄 主軸靜剛性試驗數據--PA-1

參考文獻

[1].黃俊宏, "綜合加工機用各種7/24刀把介紹", 機械工業雜誌, 三月號, 168期, 中華民國86年。

[2].黃俊宏, "綜合加工機的刀把", 機械工業雜誌, 四月號, 中華民國82年, PP. 301~314。

[3].J. AGAPIOU, E. RIVIN, "TOOLHOLDER/SPINDLE INTERFACES FOR CNC MACHINE TOOLS", ANNALS OF THE CIRP, 44, 1, 1995, PP. 383~387。

[4].M. WECK, I. SCHUBERT, "NEW INTERFACE MACHINE/TOOL: HOLLOW SHANK", ANNALS OF THE CIRP, 43, 1, 1994, PP. 345~348。

[5].王文瑞, "主軸性能檢測方法", 機械工業雜誌, 三月號, 中華民國86年, PP.223~233。

[6].N. URMAZE, "CHATTER-FREE MILLING AND OPTIMIZED MATERIAL REMOVAL RATES: ANALYSIS OF CH -ATTER IN MILLING", HTTP://WWW.MMSONLINE/ARTICLES/。

[7].台中精機集團, "工具機主軸靜剛性分析與測試之整合", HTTP://WWW.OR.COM.TW/MZ。

[8].S. SMITH, T. P. JACOBS, J. HALLEY, "THE EFFECT OF DRAWBAR FORCE ON METAL REMOVAL RATE -IN MILLING", ANNALS OF THE CIRP, 48, 1, 1999, PP. 293~296。

[9].J. A. BRANDON, K. J. H. AL-SHAREEF, "OPTIMIZATION STRATEGIES FOR MACHINE TOOL SPINDLE -BEARING SYSTEMS: A CRITICAL REVIEW", JOURNAL OF ENGINEERING FOR INDUSTRY, VOL. 114, 1992, PP. 244~253。

[10].T. TERMAN, J. G. BOLLINGER, "GRAPHICAL METHOD FOR FINDING OPTIMUM BEARING SPAN", MACH INE DESIGN, MAY, 27, 1965, PP. 159~162。

[11].H. R. EL-SAYED, "BEARING STIFFNESS AND THE OPTIMUM DESIGN OF MACHINE TOOL SPINDLES", MACHINERY AND

PRODUCTION ENGINEERING, NOVEMBER, 6, 1974, PP. 519~524。
[12].H. R. EL-SAYED,"DYNAMIC BEHAVIOUR OF MACHINE TOOL SPINDLES MOUNTED IN THREE BEARINGS" ,MACHINERY AND PRODUCTION ENGINEERING, FEBRUARY, 6, 1974, PP. 139~144。
[13].W. POPOLI, "HIGH SPEED SPINDLE DESIGN AND CONSTRUCTION", HTTP://WWW.MMSONLINE/ARTICLE -S/。
[14].陳威廉, "工具機主軸軸承的預壓", 機械月刊, 一月號, 2001, PP. 234~241。
[15].M. WECK, "SPINDLE-BEARING SYSTEMS FOR HOGH-SPEED APPLICATIONS IN MACHINE TOOLS", ANNA -LS OF THE CIRP, 42, 1, 1993, PP. 445~448。
[16].黃俊弘, "工具機主軸的專利回顧", 機械工業雜誌, 四月號, 中華民國83年, PP.197~206。
[17].唯薰, "可變預壓以實現高轉速及高剛性的主軸用軸承組", 機械技術, 106, 1993, PP. 65~72。
[18].F. P. WARDLE, S. J. LACEY, S. Y. POON, "DYNAMIC AND STATIC CHARACTERISTICS OF A WIDE SPEED RANGE MACHINE TOOL SPINDLE", PRECISION ENGINEERING, VOL. 5, NO. 4, 1983, PP. 175~183。
[19].J. A. BRANDON, K. J. H. AL-SHAREEF, "ON THE VALIDITY OF SEVERAL COMMON ASSUMPTIONS IN THE DESIGN OF MACHINE TOOL SPINDLE-BEARING SYSTEMS", INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS AND MANUFACTURE, VOL. 31, NO. 2, 1991, PP. 235~248。
[20].S. YANG, "A STUDY OF THE STATIC STIFFNESS OF MACHINE TOOL SPINDLES", INTERNATIONAL JO -URNAL OF MACHINE TOOL DESIGN AND RESEARCH, VOL. 21, NO. 1, 1981, PP. 23~40。
[21].M. WECK, "HANDBOOK OF MACHINE TOOLS- VOL. 2- CONSTRUCTION AND MATHEMATICAL ANALYSIS", JOHN WILEY & SONS, 1984, PP.193~194。
[22].徐國慶, "CNC綜合加工機整機規格分析", PMC圖書室, 002049, PP. 107~163。
[23].日本規格協會, "JIS工作機械", 1996, PP. 6230。
[24].J. TLUSTY, R. LIVINGSTON IV, Y. B. TENG, "NON-LINEARITIES IN SPINDLE BEARINGS AND THE -IR EFFECTS", ANNALS OF THE CIRP, 35, 1, 1986, PP. 269~273。
[25].周麟恩, 蘇耀藤, "高速主軸軸承系統之運動與動態特性分析", 碩士論文,中山大學機械工程研究 所, 中華民國90年6月。
[26].N. LYNAGH, H. RAHNEJAT, M. EBRAHIMI, R. AINI, "BEARING INDUCED VIBRATION IN PRECISION HIGH SPEED ROUTING SPINDLES", INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS AND MANUFACTURE, VOL. 40, 2000, PP. 561~577。
[27].N. T. LIAO, J. F. LIN, "A NEW METHOD FOR THE ANALYSIS OF DEFORMATION AND LOAD IN A BA -LL BEARING WITH VARIABLE CONTACT ANGLE", JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN, VOL.123, 2001 , PP. 304~312。
[28].T. A. HARRIS, "ROLLING BEARING ANALYSIS-3RD ED.", JOHN WILEY & SONS, 1991。
[29].T. L. H. WALFORD, B. J. STONE, "THE MEASUREMENT OF THE RADIAL STIFFNESS OF ROLLING EL -EMENT BEARINGS UNDER OSCILLATING CONDITIONS",JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING SCIEN -CE, VOL. 22, NO. 4, 1980, PP. 175~181。
[30].B.J.STONE,"THE STATE OF ART IN THE MEASUREMENT OF THE STIFFNESS AND DAMPING OF ROLLIN -G ELEMENT BEARINGS", ANNALS OF THE CIRP, VOL. 31, NO. 2, 1982, PP. 529~538。
[31].M. F. WHILE,"ROLLING ELEMENT BEARING VIBRATION TRANSFER CHARACTERISTICS: EFFECT OF ST -IFFNESS", JOURNAL OF APPLIED MECHANICS, VOL. 46, 1979, PP. 677~684。
[32].V. R. REDDY, A. M. SHARAN, "THE FINITE ELEMENT MODELLED DESIGN OF LATHE SPINDLES: THE STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS", JOURNAL OF VIBRATION, ACOUSTICS, STRESS, AND RELIABILIT -Y IN DESIGN, VOL. 109, 1987, PP. 407~415。
[33].Y. KANG, Y. P. CHANG, J. W. TSAI, S. C. CHEN, L. K. YANG, "INTEGRATED "CAE" STRATEGIE -S FOR THE DESIGN OF MACHINE TOOL SPINDLE-BEARING SYSTEMS", FINITE ELEMENTS IN ANALYS -IS AND DESIGN, VOL. 37, 2001, PP. 485~511。
[34].郭慶祥, 吳政憲, "工具機高速主軸之性能測試與分析", 碩士論文, 大葉大學機械工程研究所, 中華民國89年7月。
[35].T. AOYAMA, I. INASAKI, "PERFORMACES OF HSK TOOL INTERFACES UNDER HIGH ROTATIONAL SPEE -D", ANNALS OF THE CIRP, VOL. 50, NO. 1, 2001, PP. 281~284。
[36].Z. M. LEVINA, "STIFFNESS CALCULATIONS FOR CYLINDRICAL AND TAPER JOINTS", MACHINES & T -OOLING, VOL. 41, NO. 3, 1970, PP. 5~11 [37].Z. M. LEVINA, "TAPER-CONNEXION STIFFNESS", MACHINES AND TOOLING, VOL. 44, NO. 10,1973 , PP. 21~26。
[38].T. R. KIM, S. M. WU, K. F. EMAN, "IDENTIFICATION OF JOINT PARAMETERS FOR A TAPER JOIN -T", JOURNAL OF ENGINEERING FOR INDUSTRY, VOL. 111, 1989, PP. 282~287。
[39].I. L. FADYUSHIN, A.R. MASLOV, "ACCURACY OF TAPER-SPINDLE BORES AND ITS EFFECT ON TOOL CLAMPING", MACHINES & TOOLING, VOL. 43, NO. 5, 1972, PP.59~60。
[40].J. H. WANG,"INVESTIGATION OF THE TOOL HOLDER SYSTEM WITH A TAPER ANGLE 7:24",INTERNAT -IONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS AND MANUFACTURE, VOL. 34, NO. 8, 1994, PP. 1163~1176。
[41].林呈彰, 蕭庭郎, "主軸拉刀力動態量測及探討", 中國機械工程學會第15屆全國學術研討會論文 集,中華民國87年11月, PP. 567~573。

[42].D. J. EWINS, "MODAL TESTING-THEORY , PRACTICE AND APPLICATION 2ND ED.", RESEARCH STUD -IES PRESS, 2000。
[43].R.J. ALLEMANG, "VIBRATIONS: ANALYSIS AND EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS", COURSE NOTES: UC-SDRL-CN-20-263-662, UNIVERSITY OF CINCINNATI, FEBRUARY, 1999。
[44].D.J. INMAN, "ENGINEERING VIBRATION", PRENTICE HALL, 1994。
[45].HP,"THE FUNDAMENTALS OF MODAL TESTING-APPLICATION NOTE 243-3", HTTP://WWW.AGILENT.COM 。
[46].P. AVITABILE, "EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS-A SIMPLE NON-MATHEMATICAL PRESENTATION",WW -W.SANDVMAG.COM。
[47].PCB,"INTRODUCTION TO PIEZOELECTRIC ACCELEROMETERS", HTTP://WWW.PCB.COM/TECH_ACCEL.HTM -L。
[48].M.XU,J.R.BIRCHMEIER,"DYNAMIC STIFFNESS TESTING AND ITS APPLICATIONS IN MACHINE TOOLS" ,SOUND AND VIBRATION, JUNE,1997, PP. 14~23。
[49].J. MATHEWS, "GUIDE TO ADHESIVELY MOUNTING ACCELEROMETERS", ENDEVCO, TECHNICAL PAPER 3 12, HTTP://WWW.ENDEVCO.COM/TEST/LITERATURE_TECH.HTM。
[50].R.D.SILL,"MINIMIZING MEASUREMENT UNCERTAINTY IN CALIBRATION AND USE OF ACCELEROMETERS ",ENDEVCO, TECHNICAL PAPER 299, HTTP://WWW.ENDEVCO.COM/TEST/LITERATURE_TECH.HTM。
[51].E.I.RIVIN,"TRENDS IN TOOLING FOR CNC MACHINE TOOLS: TOOL-SPINDLE INTERFACES",MANUFACT -URING REVIEW, VOL. 4, NO. 4, 1991, PP. 264~274。
[52].SKF,"PRECISION BEARINGS", SKF, 1987。
[53].J. BRANDLEIN, P. ESCHMANN, L. HASBARGEN AND K. WEIGAND, "BALL AND ROLLER BEARINGS:THE -ORY, DESIGN AND APPLICATION 3RD", JOHN WILEY & SONS, 2000。
[54].黃俊弘, "高速主軸之技術發展與應用", 機械工業雜誌, NO. 204, 三月號, 中華民國89年。
[55].王敬勝, "氣浮高速主軸拉刀機構之拉刀力有限元素分析", 碩士論文, 高雄第一科技大學機械與 自動化工程所, 中華民國90年7月。
[56].K. G. MCCONNELL, "VIBRATION TESTING: THEORY AND PRATICE", JOHN WILEY & SONS, 1995。
[57].MTS SYSTEMS CORPORATION, "SIBLAB USER GUIDE, V. 3.2.4"。
[58].V. ADAMS, A. ASKENAZI, "BUILDING BETTER PRODUCTS WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS", ONWOR -D PRESS, 1999 。
[59].詹子奇, 吳政憲, "高速化工具機動態特性分析與改善", 碩士論文, 大葉大學機械工程研究所, 中華民國88年6月。
[60].STRUCTURAL DYNAMICS RESEARCH CORPORATION, "I-DEAS ONLINE HELP LIBRARY", MTS SYSTEMS CORPORATION。
[61].R. ZEILLINGER, H. KOTTRITSCH, "DAMPING IN A ROLLING BEARING ARRANGEMENT",SKF, HTTP:// EVOLUTION.SKF.COM。