

| 目 錄 | | 頁 次 |
|-----------------------------------|--|-----|
| 中文摘要. | | i |
| 英文摘要. | | ii |
| 誌 謝. | | iii |
| 目 錄. | | iv |
| 表目錄. | | v |
| 圖目錄. | | v |
| 第一章 緒 論 | | 1 |
| 1.1 前言. | | 1 |
| 1.2 研究動機. | | 1 |
| 1.3 文獻回顧. | | 6 |
| 1.4 結論. | | 9 |
| 1.5 論文架構說明. | | 9 |
| 第二章 不考慮機台時之進給系統溫升熱變形測試與分析 | | 11 |
| 2.1 前言. | | 11 |
| 2.2 進給系統簡介. | | 11 |
| 2.3 滾珠導螺桿與螺帽. | | 12 |
| 2.3.1 雙螺帽預壓方式. | | 13 |
| 2.3.2 單螺帽預壓方式. | | 14 |
| 2.4 支撐軸承. | | 15 |
| 2.5 聯軸器. | | 20 |
| 2.6 光學尺. | | 20 |
| 2.7 滾珠導螺桿溫升熱位移實驗設備. | | 21 |
| 第三章 考慮機台變形之立式切削中心機溫升熱變形測試與分析 | | 22 |
| 3.1 前言. | | 22 |
| 3.2 立式切削中心機簡介. | | 22 |
| 3.3 立式切削中心機溫升熱變形量測. | | 24 |
| 3.3.1 立式切削中心機溫升熱變形實驗方法. | | 24 |
| 3.3.2 熱變形量測系統及測試儀器介紹. | | 25 |
| 3.3.3 溫度感測器量測設備及位置佈置圖. | | 27 |
| 3.4 立式切削中心機溫升熱變形補償數學模型建立. | | 30 |
| 3.4.1 理論基礎—齊次轉換模型. | | 30 |
| 3.4.2 相關係數. | | 41 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第四章 實驗結果分析與討論 | 48 |
| 4.1 進給系統溫升熱位移測試數據分析. | 48 |
| 4.1.1 滾珠導螺桿預拉溫升熱位移測試數據分析. | 48 |
| 4.1.2 溫度控制測試數據分析. | 51 |
| 4.1.3 位置回饋測試數據分析. | 52 |
| 4.2 進給系統溫升熱位移實驗數據. | 53 |
| 4.3 立式切削中心機溫升熱變形測試數據分析. | 63 |
| 4.3.1 進給系統溫升熱位移測試方法. | 65 |
| 4.3.2 進給系統溫升熱位移測試條件. | 66 |
| 4.3.3 熱變形誤差模型之建立. | 67 |
| 4.4 立式切削中心機溫升熱變形實驗數據. | 71 |
| 第五章 結論與未來研究方向 | 77 |
| 5.1 結論. | 77 |
| 5.2 未來研究方向. | 78 |
| 參考文獻. | 80 |



表 目 錄

| | 頁次 |
|---|----|
| 表 1.1 影響切削精度的層面 | 4 |
| 表 3.1 立式切削中心機結構名稱定義 | 23 |
| 表 3.2 溫度感測器貼附位置列表 | 29 |
| 表 3.3 二軸卡氏座標床軌移動系統的誤差矩陣表 | 41 |
| 表 3.4 立式切削中心機部分 X、Y、Z 方向熱位移迴歸變數相關特性比較 | 44 |

圖 目 錄

| | 頁次 |
|-------------------------------|----|
| 圖 1.1 熱發生關連圖 | 4 |
| 圖 1.2 熱變形引起之形狀及尺寸誤差 | 5 |
| 圖 1.3 研究流程圖 | 10 |
| 圖 2.1 以預壓片尺寸調整預壓方式 | 13 |
| 圖 2.2 以鋼珠尺寸調整預壓方式 | 14 |

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 2.3 | 以導程偏移調整預壓方式 | 15 |
| 圖 2.4 | 軸徑和安裝距離相對於挫屈負荷之關係 | 16 |
| 圖 2.5 | 軸徑和安裝距離相對於臨界轉速之關係 | 17 |
| 圖 2.6 | 兩端固定 | 18 |
| 圖 2.7 | 一端固定另一端支撐 | 18 |
| 圖 2.8 | 兩端支撐 | 19 |
| 圖 2.9 | 端固定另一端自由 | 19 |
| 圖 3.1 | 立式切削中心機 | 23 |
| 圖 3.2 | 非接觸式位移計量測熱位移設備簡圖 | 26 |
| 圖 3.3 | 非接觸式位移計量測熱位移詳細構造圖 | 26 |
| 圖 3.4 | 非接觸式位移計量測熱位移位置代號圖 | 27 |
| 圖 3.5 | 溫度感測器位置圖 | 28 |
| 圖 3.6 | 剛體座標系統 ($X_n Y_n Z_n$) 與參考座標系統 ($X_R Y_R Z_R$) | 31 |
| 圖 3.7 | 立式切削中心機主軸的旋轉誤差 | 34 |
| 圖 3.8 | 雙軸之座標系統示意圖 | 37 |
| 圖 4.1 | 軸座軸承施以冷卻 | 51 |
| 圖 4.2 | 光學尺裝置 | 52 |
| 圖 4.3 | 使用加工程式測試進給軸變異量曲線圖 | 53 |
| 圖 4.4 | 使用加工程式測試溫度變異量曲線圖 | 53 |
| 圖 4.5 | 滾珠導螺桿無預拉情形測試進給軸變異量曲線圖 | 54 |
| 圖 4.6 | 滾珠導螺桿無預拉情形測試溫度變異量曲線圖 | 54 |
| 圖 4.7 | 滾珠導螺桿預拉($40 \mu\text{m}$)情形測試進給軸變異量曲線圖. | 55 |
| 圖 4.8 | 滾珠導螺桿預拉($40 \mu\text{m}$)情形測試溫度變異量曲線圖. | 55 |
| 圖 4.9 | 滾珠導螺桿預拉($50 \mu\text{m}$)情形測試進給軸變異量曲線圖. | 56 |
| 圖 4.10 | 滾珠導螺桿預拉($50 \mu\text{m}$)情形測試溫度變異量曲線圖. | 56 |
| 圖 4.11 | 軸座冷卻方式測試進給軸變異量曲線圖 | 57 |
| 圖 4.12 | 軸座冷卻方式測試溫度變異量曲線圖 | 57 |
| 圖 4.13 | 光學尺測試進給軸變異量曲線圖 | 58 |
| 圖 4.14 | 光學尺測試溫度變異量曲線圖 | 58 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|----|
| 圖 4.15 | 機台置於恆溫室測試 (往復運動) 進給軸變異量曲線圖 . | 59 |
| 圖 4.16 | 機台置於恆溫室測試 (往復運動) 溫度變異量曲線圖 . . | 59 |
| 圖 4.17 | 機台置於恆溫室測試 (使用加工程式) 進給軸變異量曲線圖 | 60 |
| 圖 4.18 | 機台置於恆溫室測試 (使用加工程式) 溫度變異量曲線圖 | 60 |
| 圖 4.19 | 軸座冷卻方式 + 光學尺測試進給軸變異量曲線圖 | 61 |
| 圖 4.20 | 軸座冷卻方式 + 光學尺測試溫度變異量曲線圖 | 61 |
| 圖 4.21 | 軸座冷卻方式 + 恆溫測試進給軸變異量曲線圖 | 62 |
| 圖 4.22 | 軸座冷卻方式 + 恆溫測試溫度變異量曲線圖 | 62 |
| 圖 4.23 | 立式切削中心機主軸溫升熱變形量測系統架構圖 | 66 |
| 圖 4.24 | 立式切削中心機主軸溫升熱變形補償系統架構圖 | 70 |
| 圖 4.25 | 測試條件 1 之時間與熱變形關係圖 (補償前) | 71 |
| 圖 4.26 | 測試條件 1 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償前) . | 71 |
| 圖 4.27 | 測試條件 1 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖 (補償前) | 72 |
| 圖 4.28 | 測試條件 2 之時間與熱變形關係圖 (補償前) | 72 |
| 圖 4.29 | 測試條件 2 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償前) . | 73 |
| 圖 4.30 | 測試條件 2 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖 (補償前) | 73 |
| 圖 4.31 | 測試條件 1 之時間與熱變形關係圖 (補償後驗證) . . . | 74 |
| 圖 4.32 | 測試條件 1 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償後驗證) | 74 |
| 圖 4.33 | 測試條件 1 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖(補償後驗證) | 75 |
| 圖 4.34 | 測試條件 2 之時間與熱變形關係圖 (補償後驗證) . . . | 75 |
| 圖 4.35 | 測試條件 2 之 T1~T8 時間與溫度上升關係圖 (補償後驗證) | 76 |
| 圖 4.36 | 測試條件 2 之 T9~T16 時間與溫度上升關係圖(補償後驗證) | 76 |